《现代大气科学丛书》
编辑委员会

作者简介

朱瑞兆，研究员，曾任室主任、研究所所长等职。经过多年的潜心研究，提出了中国应用气候的概念，在建筑气候中研究城市规划与气候的关系，给出了风压、雪压计算模式，以及采暖通风空调的气候指标；在太阳能、风能研究中最先提出风能计算模式并首次给出中国风能分布和区划图以及复杂地形下风场数值模拟，主编了中国科学技术蓝皮书《气候》，同时还进行了中国气候和不同气候区域中城市气候研究等。出版专著十余种，其中一种由台湾再版。

曾先后获“全国科技重大贡献先进工作者”称号、享受政府特殊津贴、荣获国家科技进步奖二等奖一次、三等奖二次、部局级奖六次。被英国 IBC 收入世界名人传记。

序

大气科学是研究地球大气圈及其与陆面、海洋、冰雪、生态系统、人类活动相互作用的动力、物理、化学过程及其机理。由于人类的生产和生活活动离不开大气,因此,这门科学不仅在自然科学中具有重要的科学地位,而且在国家的经济规划、防灾减灾、环境保护和国防建设中都具有重要的应用价值。

随着人类生产活动的发展和科学技术水平的提高,特别是电子计算机和气象卫星及太空遥感探测大气技术的提高,大气科学得到了迅速的发展,它已形成了诸多分支学科,如大气探测学、天气学、气候学、动力气象学、大气环境学、大气物理学、大气化学等分支学科。为了回顾近百年来大气科学的发展成就以及展望21世纪初大气科学的发展、创新与突破,我们编写了这套《现代大气科学丛书》。它包括《大气科学概论》、《大气物理与大气探测学》、《大气化学概论》、《大气环境学》、《动力气象学导论》、《现代天气学概论》、《现代气候学概论》、《应用气候学概论》共八卷。本书是其中的一卷。

在编写这套丛书时,内容力求简明扼要、通俗易懂,每部书的内容结构力求全面、系统。各卷还包括了对各分支学科的发展历程、研究方法和对今后的展望,以使读者对现代大气科学各分支学科有一个全面的了解。

由于我们学识有限,加之本套丛书涉及的内容较为广泛,书中难免有不妥之处,希望读者给予指正。

本套丛书得到了中国科学院大气物理研究所的大力支持和资助,在此表示衷心的感谢。

此外,《中国现代科学全书》编辑工作委员会对本套丛书的组稿和书稿的排版做了不少工作,在此给予说明。王磊和刘春燕两同志对于本套丛书书稿做了许多工作,鲍名博士在此套丛书出版的联系方面付出许多精力,也在此表示感谢。

《现代大气科学丛书》编辑委员会

主编　黄荣辉*

2005年5月18日

* 黄荣辉,中国科学院院士

前 言

应用气候学是利用气候学的理论，解决国民经济各部门的具体气候问题的一门学科。气候能够促进或妨碍人类活动，它可能是有利的，也可能是有害的。应用气候学研究的目的，就是充分应用气候有利的一面，为人类获得最大的经济和社会效益，并保持良好的生态环境，同时，使气候灾害所造成的社会和经济损失减小到最低。

世界气候计划(WCP)包括四个子计划。世界气候应用计划(WCAP)是其中之一。中国国家气候计划由五个分计划组成，国家气候应用计划也是其五个组成部分之一。世界气候计划提出："气候应用问题几乎涉及到全部人类生活领域。气候工作能为各项生产为达到经济、高效和安全的目的提供各种参数、信息和专门咨询。"

我国应用气候开发利用历史久远，早在战国末期《吕氏春秋》已有与农业活动息息相关的24节气的记载。西周有利用太阳能取火，即"阳燧取火"的记载。风能利用、医疗与气候关系等也有几千年的历史。随着科学技术的发展，人们对气候资源的应用不但更趋合理深入，而且应用范围也更为扩大。

当今在太阳能、风能、农业、建筑、水资源、交通通讯、医疗、旅游、商业等方面，已广泛地应用了气候知识。实践证明，是凡顺应气候规律的，不但可以避免或减轻遭受恶劣气候的危害，还可以得到很大的社会和经济效益；凡没有按照气候规律或是对气候灾害估计不足就会造成很大的生命财产损失。

我国近几十年在应用气候方面作了大量的研究工作，并有系统的成果，有的已被国家规划、规范、设计等采用。本书总结了这些成果，内容丰富而较全面，有理论分析、计算方法和实际应用的事例，它的出版对正确应用气候资源和推动我国应用气候的持续发展以及创新无疑具有十分重要的作用。

本书是《现代大气科学丛书》的八卷之一。中国科学院大气物理研究所黄荣辉院士对本书的编写作了具体指导并提供了良好的条件。但由于应用气候学的研究面宽、范围广、内容复杂、要求严格、发展快、变化多等特点，以及随着我国人口的增长和人们生活水平的提高，对应用气候的要求更高，所以书中难免存在诸多不足和疏漏之处，尚需读者不吝指正。

本书的前言、第一章、第二章、第三章、第八章、第九章由朱瑞兆编写；第四章、第六章、第七章由谭冠日编写；第五章由王石立编写。

朱瑞兆对本书提纲设定，各章内容的取舍提供了建议，并对全书稿进行了校阅和修改。

朱瑞兆

2005年5月

目 录

第一章 绪 论

应用气候在国际上称为气候应用(Climate Application),其内涵是一致的。应用气候学是利用气候学的理论,解决国民经济各部门的具体气候影响的一门实用科学。

气候是自然环境的一个组成部分,气候能够促进或阻碍人类的活动。气候变化可能是有利的,也可能是有害的。应用气候学的研究就是充分应用气候的有利一面,以最小的代价,减少气候造成的损失。对规划和设计人员以及企业经营者说来,应用气候能够减少气候灾害所造成的社会和经济损失。

应用气候学研究的范围很广,但农业生产、水力资源、能源(包括可再生能源)、交通通讯和人类居住环境和卫生以及商业等最易受到气候的影响。应用气候就是要了解各个领域和气候间的关系,明确其易受气候影响的关键环节,研究不同的气候价值(指标值)。这类研究还包括了气候极端事件,也就是对正常气候来说为非典型气候系统状态对社会和经济各个方面的影响,进而根据这些研究采取适当的措施防御其破坏性。

世界气象组织(WMO)的世界气候计划(WCP)中的世界气候应用计划(WCAP)指出:气候应用的目标:是推动社会提高其完成各项活动的能力,在不同的气候条件下获得最大的经济和社会效益,并使环境不受破坏。

第一节 应用气候学的历史

在整个人类文明发展史的进程中,气候对人类活动的影响非常重要。气候是一门古老的科学,一直都在促进人类生产力的发展。我国历代劳动人民在长期实践中积累和丰富了应用气象知识。这种知识不仅为人们生产、生活等各项活动所需要,而且也为气象科学理论的发展作出了贡献。以下分几个方面简述。

一、农业气候

农业生产与气候关系非常密切,因而从古代就留传下来一些论著。秦代《吕氏春秋》、西汉的《氾胜之书》,后魏的《齐民要术》,南宋的陈敷《农书》,元代的《农桑辑要》和《王祯农书》,明代的《农政全书》等。这些著作中都对天时和气象条件作了专门的叙述。

如《吕氏春秋》的《审时》篇,有"凡农之道,厚(候)之为宝。"就是说在农业生产的活动中,气候是最宝贵的因素。该篇还对一些作物得时和失时作了陈述,最后总结出:"……是故得时之稼兴,失时之稼约。茎相若,称之得时者重,粟之多。量粟相若,而舂之,得时者多米。量米相若,而食之,得时者忍饥。是故得时之稼,其臭香,其味甘,其气章。百日食之,耳目聪明,心意睿智,四卫(肢)变强,气不入,身无苛(病)殃。"这说明农业生产顺着气候规律可以得到好的收成,而且籽粒饱满。

与气候紧密联系的天文和农业。二十四节气是根据太阳在黄道上的位置,将全年分为二十

四个等分。二十四节气远在春秋时代的《左传》一书中已有春分、夏至、秋分、冬至利用圭表测日影方法的观察记载。有了两分两至这四个节气，这对农业生产安排有一定的作用，但是其间相隔 3 个月左右，必然不能满足农业生产的需要。到秦时，《吕氏春秋》中有十二纪(即 12 个月)，每月中记有立春、春分(日夜分)、立夏、夏至(日长至)、立秋、秋分(日夜分)、立冬、冬至(日短分)等节气名称。此外，在一月有“蛰虫始振”，二月有“始雨水”，五月有“小暑至”，七月有“白露降”，九月有“霜始降”等记载。西汉时期淮南刘安著《淮南子》一书的天文训篇中已有完整的二十四节气名称，与现在的二十四节气名称完全相同。二十四节气渊源流长，主要是它已成为安排农业生产活动的依据。

二十四节气大部分反映了气候的变化，如小暑、大暑、处暑、小寒、大寒反映一年中气温高、低的变化；雨水、谷雨、小雪、大雪反映了一年中降水形式；白露、寒露、霜降反映了秋季气温逐渐下降的过程；惊蛰、清明、小满、芒种反映了春季气温回升、天气晴朗、土地解冻，蛰伏地下的昆虫开始出土活动，夏季麦类开始饱满，但尚未成熟，气温继续升高有芒的作物成熟等。

事实上二十四节气能够表示一年中冷暖雨雪的情况和一年四季气候变化的特征，特别是与农业生产紧密结合的特点。

与二十四节气的同时，有七十二候的记载。在《吕氏春秋》有候应的记述，那时二十四节气也不完善，所以候应按月编排，各月的候应多少也不一样。《淮南子》在每一节气中对候的记载没有一定数目，也不齐全。到周朝周公所著的《逸周书·时则训》才将 1 年分为 72 候，按节气每 5 d 为 1 候，每候对应一个候应，并制有二十四节气与 72 候图，将图转换成表(如表 1.1.1)。

表 1.1.1 二十四节气和 72 候对应的候应

春季	节气	立春	雨水	惊蛰	春分	清明	谷雨
	候应	东风解冻 蛰虫始振 鱼陟负冰	獭祭鱼 候雁北 草木萌动	桃始华 仓庚鸣 鹰化为鸠	玄鸟至 雷乃发声 始电	桐始华 田鼠化鴽 虹始见	萍始生 鸣鸠拂羽 戴胜降于桑
夏季	节气	立夏	小满	芒种	夏至	小暑	大暑
	候应	蝼蝈鸣 蚯蚓出 王瓜生	苦菜秀 靡草死 麦秋至	螳螂生 鵙始鸣 反舌无声	鹿角解 蜩始鸣 半夏生	温风至 蟋蟀居 壁鹰始蛰	腐草为萤 土润溽暑 大雨时行
秋季	节气	立秋	处暑	白露	秋分	寒露	霜降
	候应	凉风至 白露降 寒蝉鸣	鹰乃祭鸟 天地始肃 禾乃登	鸿雁来 玄鸟归 群鸟养羞	雷始收声 蛰虫坏户 水始涸	鸿雁来宾 雀入大水为蛤 菊有黄华	豺乃祭兽 草木黄落 蛰虫咸俯
冬季	节气	立冬	小雪	大雪	冬至	小寒	大寒
	候应	水始冰 地始冻 雉入大水为蜃	虹藏不见 天气上升 闭塞成冬	鹖鴠不鸣 虎始交 荔挺出	蚯蚓结 麋角解 水泉动	雁北乡 鹊始巢 雉鸲	鸡乳 征鸟厉疾 水泽腹坚

由表 1.1.1 可以看出,72 候是从物候学角度反映气候的。但有些候应不科学如鹰化为鸠、腐草为萤、雀入大水为蛤、雉入大水为蜃等。

西汉《氾胜之书》是总结当时黄河中下游农业技术的书。如"凡耕之本,在于趣时"。"种麦得时无不善,夏至后七十日,可种宿麦,早种则虫而有节,晚种则穗小而少实"。

对保水保墒有:"冬雨雪止,辄以(物)蔺之,掩地雪,勿使从风飞去,后雪复蔺之;则立春保泽,冻虫死,来年宜稼"。

对防霜的措施有:"植禾,夏至后八十、九十日,常夜半候之,天有霜若白霜下,以平明时,令两人持长索相对,各持一端,以槩禾中,去霜露,日出乃止。如此,禾稼五谷不伤矣"。

《齐民要术》是我国完整保存至今最早的一部农书。比较系统地总结了 6 世纪以前黄河中下游农业生产经验。书中记载的旱作的耕作和谷物栽培方法等显示出当时我国农业生产水平已达到相当的高度。如:"春雨难期,必须借泽,蹉跎失机,则不得矣"。"四月亢旱,不浇则不长,有雨则不须。四月以前虽旱,亦不须浇,地实保泽,雪势未尽故也"。

对防霜指出:"凡五果花盛时,遭霜则无子。常预于园中往往贮恶草生粪,天雨新晴,北风寒切,是夜必霜。此时放火作煴,少得烟气,则免于霜矣"。这种烟熏法的防霜措施,至今仍在沿用。

《齐民要术》以后,也有不少重要农业与气候方面的书,如宋代陈敷撰的《农书》,元代孟祺、畅师文、苗好谦撰的《农桑辑要》和王桢撰《农书》以及明人徐光启撰的《农政全书》等,这些书中大量辑录了古代和当时的书藉和文献,也提出了一些自己的见解。如:

《王祯农书》中有:"天下地土,南北高下相半,且以江淮南北设之:江淮以北,高田平旷,所种宜黍稷等稼,江淮以南,下土涂泥,所种宜稻秫。又南北渐近,寒暖殊别,故所种早晚不同;惟东西寒暖稍平,所种杂错,然亦有高下之殊"。可见当时种植作物已考虑了纬度南北,地势高低对农业气候的影响。

二、可再生能源开发利用历史

所谓可再生能源,是指那些随着人类的大规模开发和长期利用,总的数量不会逐渐减少趋于枯竭,而且在自然界可以不断生成并有规律地得到补充,不断再生的能源。如太阳能、风能、水能、海洋能、潮汐能等。事实上可再生能源是相对趋于枯竭的一次能源、煤、石油、天然气和原子能等不能再生而言的。

从气象角度分析,太阳能和风能与气象关系最为密切,而且,太阳辐射、日照、风向、风速等都是气象要素。

(一)太阳能利用

人类利用太阳能的历史比较悠久。我国是世界上最早利用太阳能的国家之一。据史籍记载,远在 3 000 多年前的西周时代(公元前 11 世纪),就已有了"阳燧取火"技术的记载了,所谓"阳燧",就是形似凹面镜的金属圆盘,对着太阳聚光,在聚光点点燃艾绒等易燃物,取得火种。这是一种最古老的太阳能聚光器。1990 年第十一届亚运会火炬的火种,就是于 8 月 7 日下午,在距拉萨市以北约 100 km 的念青唐古拉峰下,由 15 岁的藏族少女达娃央宗用木柴从抛物面聚光太阳灶上获得的。原理与古代阳燧差不多,唯聚光所用的材料有较大的差别。阳燧取火技术在世界太阳能利用科学史上占有重要的地位。

北京中国历史博物馆收藏有春秋、汉、唐、宋等朝代利用太阳能取火的阳燧。天津艺术博物馆也珍藏有汉代的阳燧,上面镌刻清晰的铭文:"五月五,丙午,火燧可取天火,除不祥兮","宜

子先君，子宜之，长乐未央”。在公元前5世纪《墨经》的作者墨翟和他的学生，对凹面镜的光学原理作了进一步的试验。把焦点称为“中燧”，当物体置于中燧之内，得正立像，距中燧近则像大，反之则小；当物体置于中燧之外，得倒立像；在中燧处，像与物重合。到西汉淮南王刘安（公元前179～前122年），曾招致宾客方术之士数千人，集体编写《淮南子》。其中有：故阳燧见日，则燃而为火”。北宋沈括（1031～1095年）撰《梦溪笔谈》中有“阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内，离镜一二寸，光聚为一点，大如麻菽，着物则火发。”

在1 700多年前的西晋（公元265～317年）又发现凸透镜的聚焦特性，当时没有玻璃透镜，而是以冰块作成凸透镜，在晋代张华（公元232～300年）著的《博物志》中记载：“削冰命圆，举以向日，以艾承其影，则得火”。过了几百年，到1774年法国人拉伏齐尔，才在巴黎用两透镜聚焦阳光来熔化金属。

国外认为阿基米德是利用太阳能最早的人之一。约在公元前215～210年间，古罗马帝国的舰队侵占了西西里岛，派了一支舰队攻打希腊库扎港，著名的学者阿基米德，为了保卫家乡，他让每个士兵用擦亮的铜盾，排列在城堡上，把太阳光聚集反射到入侵的罗马舰船上，结果使舰船起火，敌人仓皇逃跑。可惜无法考证，人们认为是一种传说。然而在1973年，希腊的一位科学家萨克斯博士，雇了50多名水手，各持一块长方形铜镜，聚集一只木船，结果木船起火。此可证明阿基米德用铜盾烧敌舰是可能的。

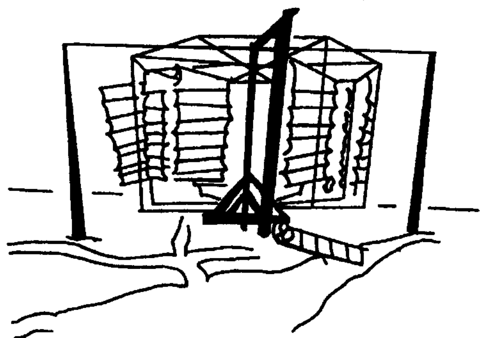
以上说明太阳能利用技术古已存在。但人类自觉地把太阳能作为一种能源利用，还是起于1615年。法国考克斯是世界上第一个把太阳能转化为机械能的人。从此，太阳能利用进入一个新的历史时期。

（二）风能利用

风能利用历史也很悠久。在距今1 800年以前的东汉刘熙所著的《释名》一书上，对帆字作了“随风张幔曰帆”的解释。明代宋应星的《天工开物》一书中载有：“扬郡以风帆数扇，俟风转车，风息则止。”这是对水平风车的一个较完善的描述。以后方以智著的《物理小识》载有：“用风帆六幅，车水灌田，淮堧海皆为之。”描述了利用风帆灌田的情况。

明代我国风车利用较普遍，童冀在他的《水车行》中有：“零陵水车风作轮，缘江夜响盘空云，轮盘团团经三丈，水声却在风轮上，……”可见我国利用风力提水灌溉和风力加工粮食的风磨至少已有350多年的历史了。

我国沿海沿江地区，风帆船和风力提水灌溉制盐一直延续到20世纪的50年代，仅在江苏沿海利用风力提水的设备曾达20万台。


图1.1.1 我国古老的立帆式风车

还要提及是，我国创造的垂直轴风轮（也称立帆式）。它是将8个帆各编在一个直立的杆上，各帆的正中上端则各由一绳系之。当地称此为“走马灯”式风车。我国出现这种风车距今已有1300多年的历史，先于世界上任何国家。我国沿海产盐地区用这种风车提海水的很多，如大沽和塘沽一带在建国初期仍可看到，如图1.1.1。

立帆式风车不受风向改变的影响，风轮总是向同一个方向旋转，较之水平风车方便，不需要对准风向的装置，这是设计上最巧妙的地方。

清代中叶，周庆所著的《盐法通志》上有这种风车的记载："风车者，借风力回转达以为用也，车帆高二丈余，直径二丈六尺许。上安布帆八叶，以受八风。中贯木轴，附设平行齿轮。帆动轴转，激动平齿轮，与水车之立齿轮相搏，则水车腹页周旋，引水而上，此制始于安凤官滩，用之以起水也"。但这种风车，创于何人还找不出明确的记载。

根据国外记载，埃及被认为是最先利用风能的国家。约在几千年前，他们就开始用风帆来协助奴隶们划浆，后用风帆磨谷、提水等。

波斯人在几千年前也开始利用风能，约在公元700年时，他们也有了立轴式风车。

据认为，是班师的十字军将风车的概念和设计带到了欧洲，可能是荷兰人发展了水平转轴、螺旋桨式的风车，这种风车在荷兰和英国的乡村是很普遍的。风力和水力很快就在中世纪的英格兰成了机械能的主要来源。在这一时期，荷兰人依靠风力来抽水、磨谷等，直到1750年，发明了扇形尾(相当电接风速仪上的尾翼)之后，才不必靠人去调准风车的方向了。荷兰人利用改进风车，广泛地用来排除沼泽地积水和灌溉莱茵河三角洲。18世纪荷兰曾有9 000座风车排除人造地的积水。

1850年以后，美国在已有风车的基础上，制造成为有名的"美国农场风车"用于提水，曾达到600万座。

总之，风力机械在蒸汽机出现之前是动力机械的一大支柱，随着煤、石油、天然气的大规模开采和廉价电力的获得，各种曾经被广泛使用的风力机械，由于成本过高，功率过低，无法与蒸汽机、发电机等相竞争，渐渐被淘汰。十几个世纪相传的辘辘而转的风车，被马力巨大的现代化电力所取代。例如，荷兰现有几百座风车，且大多是为招徕游客而开动的。美国仅在边远地区就有十几万台作为古老景观。我国在沿海的盐场尚可见到几百台。

到20世纪初，风力发电开始出现了。德国、法国、丹麦、前苏联先后制造了卧轴风力发电机，发电机功率由10 kW以上到100 kW，但都是试验性的。美国还制造了一个额定输出功率为1250 kW的大型风力发电机。叶片直径53 m，于1945年3月，作为常规电站并入电网，后因一片风叶脱落而停止，仅运行了33 d(天)。1990年以后，600～1 000 kW风力机已普遍在各国风电场运行。

我国自20世纪50年代中期开始研制小型风力发电机和提水机，60年代后，小型风力机已投入大批量生产。600 kW风力机也已批量投入生产，750 kW和兆瓦级以上风电机组将投入生产。

随着环保和保护地球的需要，从1990年世界气候大会和1992年里约热内卢国际环发大会以来，人们对环保问题越来越关注，风能是无污染的洁净的再生能源，受到国内外人们的青睐。

三、建筑气象

建筑上应用气候知识大概最早，原始人为了抵御风雨寒暑，雪、霜、雷、电，创造了供自己休息和生活的洞穴、窝棚等。根据西安距今6 000年的半坡村、河南渑池仰韶村等地的古代遗址看，住地有许多类似窝棚的小屋在一起形成一个村落，但为了躲避冬季寒风并多得到日照，门道多开在南边。

古代人们对房屋的营造，不但从房屋的结构和形式，而且对门窗大小等都考虑了气象条件。战国时《墨子·辞过》一书中记载："为宫室之法曰：高，足以辟润湿；边，足以圉(抵御)风寒；

上，足以待雪、霜、雨、露”。明确指出建筑物在兴建时，要人为地形成适合居住的小气候。

北宋初年，建都东京(今开封市)，大兴土木，由从杭州调到东京的有名木结构建筑匠喻皓，负责设计和修建在东京旧城安远门里上方寺之西开宝寺内的开宝寺塔，名叫灵感塔。这个塔平截面呈八角形，13 层，总高 120 m。当塔全部竣工后，人们发现塔北地基略高，而且向西北方向倾斜，人们认为可能是施工中造成的倾斜。喻皓解释说，这是有意设计的，塔北地基略高，因为在塔的北面数十步为五丈河，河水长年流过，必然浸蚀河床两岸地基，时间长久地基势必发生下沉，那时，塔身自然可以矫正过来。塔身向西北倾斜，是因为常吹西北风，塔身在风压力的作用下，也会正直了。由此可见，喻皓在一千多年前对风压就有见解，而且利用塔身的倾斜来预应风的压力。可惜喻皓著的《木经》三卷已失传。只能从北宋科学家沈括的《梦溪笔谈》中所录的一段中，了解其梗概。

北极的爱斯基摩人，用冰模块砌成圆顶小屋，它是完全封闭的单元，在出入口有一个门斗，避免冷空气直接侵入，在圆顶球形外表面积尽可能地小，以减少热量损失，如图 1.1.2 。这是当地人们为了适应北极的气候创建的，并在民间留存了上千年。

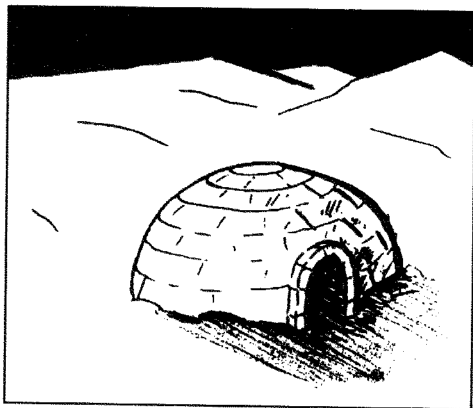


图 1.1.2 硬雪块砌成的圆顶小屋

在湿润的热带，则是开敞的棚屋，四面无遮挡，只有屋顶为了遮阳和防雨水，而且不阻碍自然通风。后来较现代一点的设备是热带平房，它有一个宽的走廊可以得到阴凉，并且有一个巧妙设计，可以使大量的穿堂风或交叉气流通过屋内，交叉气流比对面是墙的单个窗户的通风要有效得多。

我国南北东西气候差异较大，几千年来人们为了适应当地的气候，旧的民居就有各种不同的建筑风格。

新疆吐鲁番是世界上著名的洼地，低于海平面 154 m，四周高山环绕，7 月平均气温 33.5 ℃，极端最高气温 47.7 ℃。夏季极端酷热，年降水量仅 14.9 mm，相对湿度 40%，所以不但热且干燥，著称“火洲”就是这样而得名。这里的土坯、土拱建筑主要在于隔热、降温，而无需防潮。由于气温太高也就不利用自然通风降温，而是利用很厚的土坯墙、土拱屋顶以及门低窗小来隔绝室外热空气和太阳辐射的侵入。为了减少太阳辐射，房屋往往建在半地下室以避夏热，同时，建筑物普遍设置外廊，利用葡萄攀藤绿化以遮避阳光，降低夏季高温。

我国东北冬季寒冷且时间长，夏季短暂，房屋建筑以防寒保温为主。民间建筑外墙较厚，北面不开窗或开小窗，以减弱冷空气的袭击，窗户都是双层玻璃，因冬季太阳高度角较小，房屋南面开大窗，以保证屋内有充足日照，既能杀菌又能增温。东北是我国最大雪压区，所以屋顶结构较坚实都能承受较大雪压。

我国黄土高原的窑洞，在建筑上称为生土建筑，像陕北窑洞大家并不陌生。窑洞不但夏季隔热性能好，而且冬季保温性能也好。根据实际观测，夏季窑外气温在 40 ℃时，窑内为 26.7 ℃，冬季窑外气温在 −9.5 ℃，窑内温度在 0 ℃以上，所以窑洞有冬暖夏凉的美誉。

牧区牧民多住蒙古包。内蒙古冬季气温较低，夏季不很热且夏季时间短暂，所以蒙古包以御寒和防风为主，包的周围没有窗户，门朝向南或东南，避开西北风。圆形的蒙古包抗大风性能

较好，虽然这里极端最大风速较沿海为小，但大风日数全年在 50 d(天)以上，在全国来说也是名列前茅的。

北京的四合院是单体封闭的院落，北房是正房高度高，窗户大，北面一般不开窗或开小窗，利于避寒风，南面门窗大，便于吸收太阳辐射热。四合院的南房和东西厢房低矮，一方面不影响北京冬季室内有足够日照，另一方面，由于北房高大屏蔽了西北风，使院子免受寒风和风沙直接袭击。院外风沙弥漫，院内风小沙少。

长江中下游民居建筑着重通风、避雨、防潮，南北墙多对开窗户，以利穿堂风。房屋朝向考虑夏季东南风为主导风向，利于自然通风并避免过多的太阳辐射热，所以房屋朝向以南偏东为主，如上海、苏州的房屋朝向以南偏东 15°，南京南偏东 8°等。为避雨遮阳，檐口伸出较远，这里年降水量在1 000 mm以上，年降水日数在 125 d 以上。挑檐不但使房屋防潮，而且檐下也是雨天人们活动或生产的场所。

云南西双版纳傣族多居竹楼。当地盛产竹林木材，当地人利用江边山坡构筑架空楼房，也称吊脚楼。这里年降水量在1 000 mm以上，全年各月平均相对湿度在 70%左右，竹楼有通风防潮的特点，如图 1.1.3。

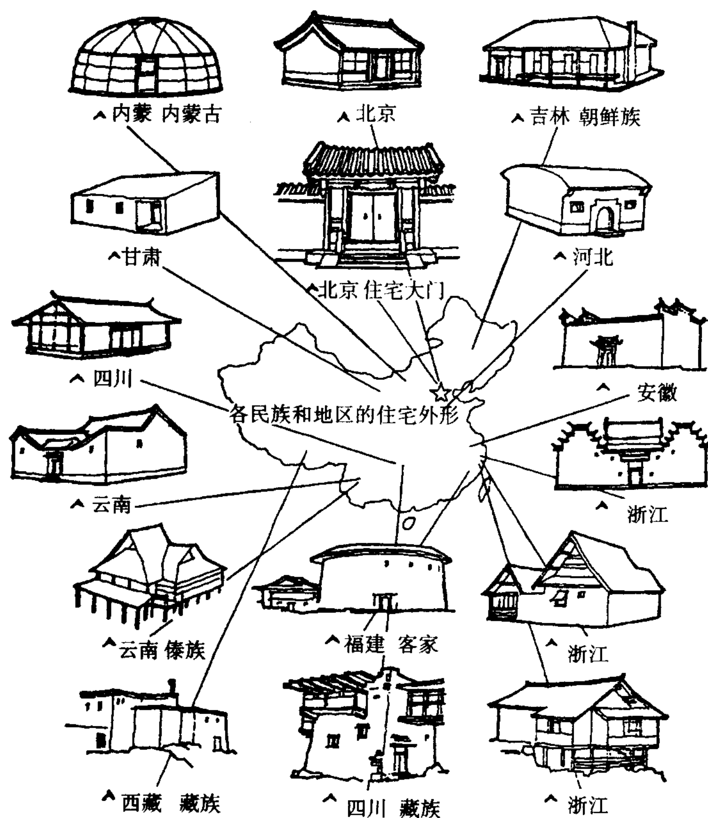


图 1.1.3 我国各民族和地区的住宅外形(引自田学哲)

为了适应各种不同气候特点，各地建筑就有着许多不同的特点。建筑设计在于建造一个局部环境，为人类健康而舒适地工作和生活，所以必须充分利用气候的有利一面，尽可能地以

最小代价来避免其不利的一面。当然也有不考虑气候招致失败的例子,例如,"文革"中北京前三门"一刀齐"的高层建筑,其建筑形式、卫生日照、建筑密度以及公共绿地等都考虑不周,仅就日照采光而论,致使建筑北侧整个冬季见不到阳光。

现代科学技术的发展,可以把各个气象要素间的相互作用,转变成对建筑有用的结果。因为每一座新的建筑物都会使邻近微气候发生变化。这种影响要及时考虑进去,以免造成以后难以纠正的错误。如在高层建筑物的拐角和楼宇间的夹道形成的强风、旋转风往往易被设计者忽视,常常造成一些不该发生的事故。所以建筑设计师在选址、室内设计、材料选择以及周围环境绿化上都要充分考虑到气候的影响。

美国有一个很好的例子,他们是以建筑来调节小气候。美国的明尼阿波利斯有一处劳林公园,在公园北侧布置连续的建筑,以便冬季遮挡北风,建筑物向南面为大玻璃窗,可以将阳光反射到公园庭院和绿化的路上。在公园的南侧布置的是塔楼以便透进阳光。

日本筑波城为了防止大气污染,其规划是以纵贯南北 9 km 长的步行专用道为中轴线,这段路不准汽车通行,以"优先步行的连续空间"做为中轴线,两侧布置建筑群,成为独具风采的新城市。

我国几个古城如北京、西安等为了多得到日光照射,街道走向多为正南正北或正东正西,由于向南的房屋日照时间最长,所以古城都是东西长、南北短。

德国瑞德特作了汉堡城市气象要素对房屋的定向作用图。因为各种气象要素对房屋的影响或多或少都有一定的方向性,所以对房屋各方向应采取不同的措施。譬如东南到西南每天平均日照大于 1 h(小时),东南到西北风的侵袭大于 30%,西北到东南方向来的风降温大于 1 ℃,降雨的 50%落在西南到西的方向。

城市规划和建筑设计都需要气候信息,而且要把气候作为一个经济变量的重要因子来考虑,充分利用这一自然资源。

前面谈的都是一般气候,对于一些气候极端值,也就是对正常气候来说的非典型天气系统状态,如台风最大风速、暴雨极值、最大积冰、最大积雪厚度等在建筑设计中也要加以考虑,要求任何一个建筑物在气候极值下都能承受,在设计上是不易达到的,在经济上也是不允许的。因此要求计算极端值出现的概率。如 50 年一遇,100 年一遇等。

在建筑设计上,合理地利用气候资源,避开不利的气候影响,就能获得最大的经济和社会效益,并能保持建筑与自然环境的完整性、和谐性。

四、交通运输气象

利用风力的帆船在我国较早。在《物原》上记载:"燧入以瓠济水,伏羲始乘桴,轩辕作舟楫,……夏禹作舵加以篷碇帆樯。"若夏禹是帆的发明人,至今已有 3 000 多年的历史了。在商周时代甲骨文里的"凡"字,刻成"月",据考证"帆"字的原始字样,就是来源于月,这一象形字也可说明帆在我国古代就已利用了。

晋代法显到印度取经,依日本安永重镌,"沙门法显自记游天竺事"称:"法显……载商人大舶,泛海西南行,得冬初信风,昼夜十四日,到师子国。……法显住此国两年,载商人大船上,……得好信风,东下三日,便值大风。……如是九十许日,乃到一国,名耶婆提。停此国五月日,复随他商人大舶上,亦二百许人,赍五十日粮,以四月十六日发,法显于舶上安居,东北行趣广州。……"法显在耶婆提(即爪哇)住五月之久,竺可桢认为主要是冬季南海东北季风不利归国

之故。由此可见,古代人们在航海过程中,知道利用风向在海上航行。

北宋诗人苏轼《舶风》诗:“三时已断黄梅雨,万里初来舶䑲风”。三时是指夏至节后 15 d(天),即农历五月。该诗序云:“吴中梅雨既过,飒然清风弥旬。岁岁如此,湖人谓之舶䑲风。是时海舶初回,云此风自海上与舶俱至云尔。”又朱国桢《涌幢小品》:“吴中五六月间,梅雨既过,必有大风连数日。土人谓之舶䑲风。云舶遇此风,日行数千里,虽猛而不为害。四明钱塘商至夏中华集者,此风致之也”。今天的认识舶䑲风是指东南季风。梅雨过后,因东南风有利于南洋商船舶来我国。

北宋沈括《梦溪笔谈》:“冬月风作大渐,船行可以为备,唯盛夏风起于顾盼间,往往罹难。……五更初起,视星月明洁,四际至地,眦无云气,便可行,至于巳时止,如此无复与暴风遇矣。”这是他对内河航行的总结。为了避免风灾,不但总结风的年变化,而且对短期风的变化还作出了航运经验性的天气预报。

明朝永乐三年(公元 1405 年),郑和率大规模舰队通使“西洋”。在 28 年中驾长风七次远洋航行,舰船为多橹多帆,充分利用风能。在海上航行还掌握了一年中风的变化规律。当时远航船 62 艘,官兵 27 800 余人,纵横于南海与印度洋上。这与意大利航海家哥伦布横渡大西洋(公元 1492 年)以及葡萄牙航海家达迦马绕非洲南端好望角到达印度(公元 1498 年)相比都早了半个多世纪;与葡萄牙麦哲伦于 1519 年第一次环球航行相比,约早了一个世纪。

近代高速公路的出现还不到 100 年,但作为高速公路的雏形——马车专用道的历史则可追溯到远古时期。公元前 6 世纪中叶的波斯帝国控制了东起印度河,西至达坦尼尔海峡,统治这个帝国的交通和通信体系便是波斯王下令修建的“高速公路网”(御道)。其中最长的一条是大流士一世从王室居地苏撒,直至小亚细亚的萨迪斯御道,全长约 2 600 km,全部用石块铺筑,设有 111 个驿站(供休息、换马、检验证件),紧急时以 37 km/d 速度前进。这些御道专供军事及行政使用,除了波斯王的使臣、士兵及王室官僚马车外,其他任何车马不得通行。这可认为是世界上最古老的“高速公路”。

波斯时代以后,兴盛数百年的罗马帝国,在整个欧洲大陆建立起道路网,道路和遗迹至今还尚存,故有“条条道路通罗马”之说。

我国秦始皇修“快道”称“秦快道”,由长安经咸阳至长城,也是专用道。同时,实行“车同轨”政策,也修建了大量御道(驰道),实际上是马车专用道。

进入 20 世纪后,汽车交通得到了迅速发展,新的现代化公路时代开始了,各种公路得到迅速的发展。

五、医疗气象

在国外称为人类生物气象。早在秦汉之际的《黄帝内经素问》中就指出:“夫百病之生也,皆生于风、寒、暑、湿、燥、火。”称之为“六气”,这与一年内的风速、温度高低、湿度大小变化紧密联系。当“六气”不正常时,人的适应能力抵抗不住这种不正常的变化,往往导致疾病的发生,称此为“六淫”。

六淫致病的原因《内经》中有详细的论述。如《风论》:“风者,善行而数变……,故风者,百病之长也,至其变化乃为他病也,无常方,然致有风气也。”这里的风气是指一年中风的变化,而四季中气候(冷热)变化与之结合,会导致疾病如风湿、风寒、风热等,所以说为百病之长。又如《热论》:“今夫热病者,皆伤寒之类也……,人之伤寒也则为病热。”指出寒为热病之因等。

《内经·灵枢·四时气》指出："四时之气，各不同形，百病之起，皆有所生。"说明人体疾病的发生与各季气候有关。四季与疾病防治《素问·四气调神大论》中指出："圣人春夏养阳，秋冬养阴，以从其根，故与万物沉浮于生长之门。逆其根伐其本，坏其真矣。"春、夏为生长蓬勃之季，故属阳，秋、冬为凝敛之季，故属阴。春、夏阳气旺盛之季，要保养人体内的阳气，以免阳衰而病，秋、冬阴气旺盛之季，要保养人体的真阴，以便更好地适应来春阳气生发的机体变化，故要顺从阴阳变化，保养阴阳之根本，违背这个规律，就会削弱机体的元真之气，而罹患疾病。

隋代巢元方《诸病源候论》中指出："……此病皆因当时不和，温凉失节，人感乖戾之气而生。"说明天气不正常时，人易受到传染病的侵袭。

汉末张仲景著《金匮要略》中："人禀五常，因风气而生长，风气虽能生万物，亦能害万物。如水能载舟，亦能覆舟。"就是说气候有一定规律，如果规律反常或超越常规，就必然不利于万物生存。

唐代孙思邈著《千金要方》指出："晴天和暖无风之时，令母将儿领日中嬉戏，故见日则血凝气刚，肌肉牢密，堪耐风寒，而不致疾病。若常藏帏帐之中，重衣温暖，譬犹阴地之草木，软脆不堪风寒也。"指出小儿长期不受日光照射易患佝偻病。北宋沈括在《梦溪笔谈》中有："医家有五运六气之术，大者候天地之变，寒暑风雨，水旱螟蝗，率皆有法；小则人之众疾，亦随气运盛衰。"这里的气运是指气候韵律，即某一种病盛衰是有周期性的。

明代名医李时珍《本草纲目》提出："升降浮沉则顺之，寒热温凉则逆之。故春月加辛温之药，……以顺春升之气；长夏宜加甘苦辛温之药，……以顺化成之气；秋月宜加酸温之药，……以顺秋降之气；冬月宜加苦寒之药……以顺冬沉之气。所谓顺时气而养天和也。"说明不同季节必须采取不同治疗方法，才能得到良好的疗效。在《素问》中有："圣人治病，必知天地阴阳，四时经纪。"总之，我国古代医疗气象是十分丰富的。

在公元前400余年希腊名医希波格拉斯(Hippokrates)著的《空气、水和土地》一书中，记载有气候对疾病和健康的影响。他指出："谁要掌握医学科学，必须懂得考虑一年四季会对人体健康产生什么影响，不但各个季节本身不同，它们的变化也不同。一个医生应特别注意保护病人抵御恶劣的季节变化。"此后，虽也有其他著述，论及气象与健康的关系，多属现象上的观察。

20世纪初，德国一些医师发表了较多报告，提出疾病的发生、发展与气象的关系，但大多是统计分析其发病的现象，缺乏生理学的基础研究。

1956年联合国教科文组织在巴黎举行了国际生物气象座谈会，1961年命名为国际生物气象学会。70年代以后，国际生物气象学会建议改名为"人类生物气象学"。从此，这门学科的发展进入了一个新阶段。

气候结合国民经济的研究工作，是在1873年国际气象组织成立后才有了雏形。那时世界气象台站网有了进一步的发展，特别是1929年成立了气候委员会和1931年成立了农业气象委员会，较系统地开展了气候为农业、航海、军事、航空、商业等的服务和研究工作。虽然应用气候在几千年前已经萌芽，但"应用气候学"这个术语，大约在20世纪50年代初才正式被国际上采用。

从WMO中气候委员会名称的变革中，也粗略可以看出20世纪对应用气候的重视程度。1929年是"气候委员会"(CCL)，1971年改名"气象学和气候学专门应用委员会"(CoSAMC)，1979年，改为"气候学和应用气象学委员会(CCAM)"，1982年以后又改为"气候委员会"(CCL)。

我国在20世纪50年代把气候为农业、工业、军事、水利、电力、交通运输、建筑、能源等的研究称为专业气候。大致在60年代末，将专业气候才统称应用气候。中央气象局于1974年10月在杭州还召开了我国第一次全国应用气候会议。参加会议的有全国各省(市、自治区)气象部门、国家基本建设委员会，工业、电力、交通、中央广播事业局以及有关大学和科研院所等单位。内容涉及建筑、电力、交通、通讯、水资源、医疗、军事等与气候有关方面。

80年代以后，各专业部门与气候的关系更得到进一步的发展，部分学科单独召开学术交流会，如气象能源、农业气象、建筑气候、医疗气象、水资源气象等会议。这种越来越细的分学科发展，说明了气候学应用的重要性，气候与其他学科在相互渗透下前进。同时，不同学科的相互渗透也促使气象学科的发展。

第二节 应用气候学的发展

气候对国民经济的作用，主要是通过应用气候特别是气候资源的开发利用来实现的。随着世界人口的迅速增加和生活标准的不断提高，人类拥有的生产力正在接近或超过十分有限的地球资源与环境的承受能力。大气是地表自然环境中变化最大而具有全球影响的一个部分。作为大气基本状态的气候，探索过去历史上的气候曾经如何影响过人类的活动，今后人类活动如何避免气候制约，因此，应用气候提供的研究成果，应该把它看作是提高社会生产力的一种有效手段。

一、应用气候学的发展基础

科学技术是第一生产力，经济建设要依靠科学技术，科学技术工作要面向经济建设。应用气候就是直接为经济建设服务的学科。随着经济建设范围的扩大，国民经济各部门对变化着的气候条件的依赖性在不断地增强，并且是随着社会生产的发展而增长的。由于气候在社会生活中的作用越来越大，现在已经形成这样一种倾向，即把气候科学转化为能够提高社会经济效益的现实力量。它是通过最优化的应用气候资源来实现的。为此，必须把气候资源的开发应用看作是提高社会生产效益的强有力的因素之一。在做规划、设计、施工、防灾、抗灾以及评价经济活动时都要充分予以考虑。

诚然，气候学研究也要密切结合国民经济建设的需要，结合生产实际，这既是气候科学为生产服务的桥梁，也是气候应用能够开拓新的领域。

开展跨学科的科研协作，将会有效地促进气候科学研究的发展，从而就要求在这一领域中开展活动。如联合国1972年在斯德哥尔摩的环境会议、1974年在罗马的世界粮食会议、1976年在温哥华的人类居住环境会议、1977年在马德普拉塔的水会议、1981年在内罗毕的新能源和可再生能源会议、1996年世界太阳能高峰会议等等。世界气象组织也召开了一系列会议如建筑气候会议、人类生物气候会议、城市气候会议等。我国这类分专业交流的如农业、建筑、交通、再生能源等与气候有关会议也很多。但是这种分散的无计划的研究成效不显著。所以世界气象组织(WMO)提出了世界气候计划这一设想，促使各国有目的、有计划、有组织地满足各国对气候提出的一系列要求。故介绍世界气候计划就能代表应用气候的发展情况，而且这一计划的实施，会促进整个气候的发展。

(一)世界气候计划的世界气候应用计划(WCAP)

70年代以来，世界气候灾害频繁，大面积干旱、洪涝、冷害等，1979年世界气候大会的一些报告提出，全球每年因自然灾害所造成的经济损失达400多亿美元。其中65%以上是天气、气候灾害引起的。因此，使社会经济计划者认识到在规划国家的社会经济发展方面应用气候知识的重要性。

1974年，世界气象组织(WMO)执委会提出，要带头推进气候变化及其对自然环境和世界粮食生产影响的研究，决定建立气候变化专家组，回顾WMO在这方面的活动，提出将其组织为一个统一计划的建议。1975年，第七届世界气象大会决定，应联合其他国际团体，规划有关气候变化的国际计划。1977年，WMO执委会要求其秘书长提出建立世界气候计划(WCP)的建议。1979年2月WMO在瑞士召开了第一次世界气候大会，有来自许多国家和国际组织的350多名专家参加会议，讨论研究制定了WCP的了内容。同年4月第八届世界气象大会通过WMO建立WCP的决议。

世界气候计划由四个子计划构成(WMO，No. 540)。恰好反映出现代气候学的四个主要方面。即：

世界气候资料计划(WCDP)；

世界气候应用计划(WCAP)；

世界气候影响计划(WCIP)；

世界气候研究计划(WCRP)。

其中WCIP由联合国环境规划署(UNEP)负责。WCRP由国际科学联盟理事会(ICSU)和WMO负责。WCDP和WCAP由WMO负责，同时负责WCP的全面协调工作。

WCP的总目标：(1)应用已有气候信息为人类谋利益；(2)提高对气候过程的认识，以确定气候的可预报性及人类对气候影响的程度；(3)监测自然的还是人为的重大的气候变化，并告诫政府这种变化可能对人类的经济或社会活动带来的显著影响。

WCP的4个子计划从1988至1997年，各计划都有主要目的、目标、重点等。本书仅涉及WCAP。

WCP中世界气候应用计划的目标是推动社会提高其完成各项活动的能力，在不同的气候条件下获得最大的经济和社会效益，并保持环境不受破坏。

世界气候应用计划的原则：为了气候信息有效的应用，必须努力去鉴别易受气候影响的过程，对这种过程要求的信息应有明确规定，而且证明气候信息与各项活动之间的定量关系。

在主要的气候资源利用方案被最后确定或在改变之前，如果提出并利用气候信息的话，那么气候信息多半是有极大经济意义的。

气候应用内容：气候信息能应用于所有国家各种不同的计划和业务活动。虽然各种各样的计划和业务活动对气候都很敏感，然而，最敏感的还是粮食生产(农、渔业、减轻作物和动物的病害、水土保持、土地利用、沙漠化的控制)；水资源(水资源评价、未来趋势预报以及对洪涝、干旱威胁的反应等)；可再生能源(太阳能、风能等开发利用)；人类居住环境(新住宅区的建筑设计、环境污染的控制、自然灾害等)；人类卫生(人类健康、旅游和娱乐活动)；交通运输(航空、海运)等。这些方面的社会经济活动长期以来已有所发展，并且适应于区域的和当地的气候环境。在许多发达国家中，足够多的气候资料已由气候学家合理地用来为有关部门提供有价值的应用信息。然而，往往计划人员和管理人员常常低估了气候作为一个经济变量的重要性，从而使这一社会经济资源没有发挥应有的作用。

WCAP 中还有气候信息的传播、国际活动、新方法的研究和促进气候信息的应用等。

气候应用计划的具体目标，应启发社会公众和制定政策的人员重视应用气候对社会经济的价值。同时也要求提供的气候信息可靠和科学理论严密性。

(二)国家气候计划的气候应用计划

目前一些发达国家，如美国、日本等已经制订了国家气候计划，并取得了一些研究成果。中国国家气候委员会于 1987 年 2 月在北京成立。其中有一个任务，是组织编制国家气候计划。

国家气候计划(NCP)的目的：(1)帮助各经济部门应用气候知识来计划和组织管理经济活动工作；(2)协调各成员部门共同确认的目标并为达到这些目标而进行相应的协作；(3)确保 NCP 真正符合国民经济建设的需要，反映各部门的愿望并力促采取必要的措施以完成议定计划；(4)保证对国家气候资料、预报服务、应用、研究工作以及对全国社会和经济发展可能产生重大影响的科学技术问题等以优先考虑；(5)确保各子计划间的必要协作，以避免力量分散及重复劳动；(6)促进我国气候工作某些薄弱环节的发展。

国家气候计划的总目标：应用已有的气候资料信息、气候科学知识和对气候规律(含气候与环境相互作用)的认识，为国家和各部门在国民经济活动方面的规划和管理，特别是国家的经济建设长远发展规划、总体布局和重大建设项目的决策，尽可能提供所需的科学咨询，提高对气候过程的认识和预报能力，特别是对未来可能出现的、能显著影响我国经济、社会发展的气候异常现象的预报能力。

1979 年 WMO 召开的第一次世界气候大会制定世界气候计划，并宣布 80 年代为《国际气候十年》。而且在大气科学的研究、长期天气过程、大气环流和海洋环流数值模拟的研究、气候资料的整编、分析和方法、气候变化的物理基础等方面都取得显著的进展。一些国家已制订了国家气候计划，并已取得了一定的研究成果。在这种良好的环境下，我国制定了国家气候计划。

我国国家气候计划内容，基本上是参照世界气候计划制定的，分 5 个分计划：

国家气候资料计划(NCDP)；

国家气候应用计划(NCAP)；

国家气候研究计划(NCRP)；

国家气候影响计划(NCIP)；

热带海洋和全球大气计划(TOGA)。

这 5 个计划分别由国家气候委员会下设的 4 个分委员会和 1 个专业委员会负责。即 NCDP 由气候资料分委员会负责，挂靠国家气象中心；NCAP 由气候应用分委员会负责，挂靠中国气象科学研究院；NCRP 由气候研究分委员会负责，挂靠在中国科学院大气物理研究所；NCIP 由气候影响分委员会负责，挂靠国家环保局；TOGA 由热带海洋和全球大气专业委员会负责，挂靠国家海洋局。这里只简单介绍 NCAP。

国家气候应用计划，基本目标是推动我国各经济部门提高在不同的气候条件下获得最大的经济和社会效益，并保持良好的生态环境。

优先考虑气候对粮食生产，水资源，可再生能源等领域的影响，以及开发大西北、华北水资源等方面的气候问题。

具体的计划：

(1)西北、华北干旱半干旱地区气候、水资源及农牧林业生产潜力的研究。着重弄清水资源对人口及工、农业的承载力。

(2)气候灾害与减灾问题的研究，重点是旱涝等极端气象水文灾害，研究灾害的标准、区域分布、发生原因与成灾机制，为减灾提供依据。

(3)气候波动与农业发展关系的研究。加强农业气候资源与灾害的动态监测、研究和开展专业气候预报，包括各种尺度的产量预报的理论与方法的研究。

(4)气候变化对流域与跨流域水资源调节的研究，为流域经济建设规划和水利工程建设、管理与调度运用提供依据。

(5)沿海经济开发区与粮食、棉花、能源等生产基地的气候资源与灾害研究，要求针对各区的特殊气候应用问题开展研究，以便取得实效。

(6)我国气象能源、建筑气候、交通气候、医疗气候、城市气候等直接关系着人民生活和生产，继续研究应用方法。

(7)开展气候应用方面的基础研究，新的应用方法正根据国家的要求大量地进行研究，根据有效的最优利用理论，研究应用的新方法。

中国第一本《气候》蓝皮书由国家气候委员会组织 4 个分委员会和 1 个专业委员会各派 2 名研究员级人员参加编写，并成立编写小组由 12 人组成。

《气候》蓝皮书的编写，是国务委员、国家科委主任宋健在国家气候委员会成立大会上发言："气候科学应指导经济建设"中提出的："……下世纪我国各地气候变化如何？我认为，我们应该在三四年内也就是在 1990 年以前，为国家经济发展战略决策，提出气候预测报告，那怕是关于气候变化趋势性的报告也好。还可以设想，能否在 1990 年由气候委员会组织有关专家编写和发布第一个我国今后十年到一百年的气候蓝皮书。这对我们后代也算有个交代，立此存照，勿谓言之不予也"。

中国科学技术蓝皮书第 5 号《气候》，1990 年正式出版，由国家科委发布。宋健在蓝皮书的序中指出："无论如何，蓝皮书中所陈述的基本观点和趋势估计是有一定科学根据的，不能忽视。应该把这些研究结果奉献给社会，向各级政府和人民解释，使更多的的人了解这些那怕是初步结论。这会帮助人民，特别是处于决策地位的人们，做出比较正确的判断，减少'蛮干'，杜绝'与大自然规律对着干'那类错误和愚蠢的行为"。

气候蓝皮书节译成英文本，作为我国参加 1996 年 10 月底到 11 月初在日内瓦召开的第二次世界气候大会中国代表的文件。以后在世界气候预测中把中国蓝皮书的意见，作为一家之言。

二、应用气候学发展的基本特点

(一)应用气候学是在气候应用与有关学科的相互渗透中发展的，应用气候学和人类的生产和生活活动是紧密联系的。

任何一门学科的发展，都需要与社会实践需求相联系，特别是应用气候学的发展更是如此。气候学要解决有关学科的气候问题，必须相互交叉渗透，才能融合出一系列的新理论新技术。如建筑气候，由于高层建筑的需要，不但要求风随高度变化的数据而且要求风振数据，也就是说高层建筑要考虑风速脉动的影响。风速脉动的频率分布用功率谱密度来反映。在建筑结构的自振周期设计时不能与风速脉动的峰值周期相重合，以免产生共振造成破坏。为了研究这些问题，在广州电视塔、武汉和南京跨江输电塔、上海电视塔、北京八达岭气象塔等进行了梯度观测和风速脉动观测，还对广州宾馆进行了位移和振动实测。气候与建筑相互结合渗透不但解

决了建筑设计上的气候问题，而且这些资料对气候学近地层风速廓线模式的建立，湍流运动内部结构的研究等都极为重要。

为了山区工厂建设，进行了山区气象考察，发现山谷逆温有三层，谷底是由山风造成的动力逆温，谷中是辐射逆温，谷顶上是山体在自由大气中形成的辐射逆温，而且逆温强度在底层可达1.4 ℃/10 m等。这些结论过去是没有的。所在山区建厂的气象考察也丰富了对山区气候的认识。

风能利用要求在有几个观测点的情况下，推算几十千米范围内各山顶、山坡、山谷的风速，因为现代风电场安装大型风机每台 600 kW 或 MW 以上，在一地安装几十台甚至几百台，每台叶轮直径就有 40～80 m 长。所以就要求各风力机安装在最佳风速位置，而且各风力机间尾流影响达到最小。这就要求用小区域气候模式解决，目前这种小区域流场模式甚少，促使研究小区域复杂地形气候动力学研究。还有，风电场选址过去是实地考察，耗费大量的人力物力。因风电场地址不但要风资源好，而且要有一定装机面积，山峰可能风速很大但面积小，同时还要求山坡平缓，200 t 以上的吊车能爬上去，距电网较近容易并网等等。目前发展利用资源卫星遥感镶嵌地理信息系统，再将风能资源叠加形成浮雕图像，显示三维立体图，然后，在此图上评估风电场可能的位置。这样也是风能开发利用引进其他学科领域的先进技术，促使应用气候学向前发展。

以上只是举几个例子，由例子可以看出，在应用气候学的发展方面既要重视科学理论又要重视学科的相互渗透，二者密切结合，相互促进，才能有效地提高为国民经济服务的质量。

(二)应用气候与用户结合形成新理论

气候科学与生产和建设技术的结合，形成共同研究的重大课题。这种课题具有高度综合和跨学科的性质，这种问题的解决所产生的社会经济作用才显著。这类课题具有应用气候学研究的特征，旨在发现生产和建设中或用户提出的与之有关的问题，用气候学新理论、新方法去研究、解决，是取得高质量成果的关键。

应用气候的研究，要依靠气候学家和各个应用领域里的专家相互配合，共同分析研究，有助于提高研究水平和效率，而且可以达到实际应用的目的。这不但可促进成果的合理应用，很快推广，还能最佳地取得经济效益。举例如下：

风能开发利用，在 20 世纪 70 年代我国发展的是 1 kW 以下的小型风力机，当时计算风能利用小时数，其指标取 3～20 m/s(即 3 m/s 风机启动，20 m/s 风机停机)，但到了 20 世纪 90 年代，风力机为 600 kW 以上，比原来大 600 倍，就不能用原来的指标，重新作出新的风能用小时数的指标，即为 3～25 m/s。这种变化就是和用户结合的结果。

道路沥青及沥青混合料气候区划。道路沥青混合料的路用性能主要受沥青性能的影响，而沥青又受到气候因素的影响，夏季高温行车造成的车辙使路面使用性能降低，冬季气温骤降引起沥青路面横向开裂。此外，水分渗入沥青与集料的界面上，使粘附性降低，在荷载的作用下，集料产生剥离、坑洞使路面破坏。区划的指标的确定，根据公路科学专家提出，他们实际观测沥青路面破坏时的气候状况。气候专家据此分析用哪种气象要素能反映这种破坏。因为对一地的沥青道路既要考虑冬季低温，又要考虑夏季高温。低温和高温还有持续时间的长短，所以不但利用 7 月平均最高温度和极端最低气温作指标，而且还利用负积温和≥25 ℃的积温作为参数。在这个基础上，再考虑水损害，取≥10 mm 的雨日作标准。采用等概率方法进行道路沥青及沥青混合料气候区划，其结果已作为公路部门的设计依据。诸如建筑气候区划、太阳能和风

能气候区划，农业气候区划，采暖区划、被服气候区划等都是与用户结合，根据有效的最优利用理论来研究，这些新成果易于被使用部门接受。

城市规划中风的问题，大气污染物的扩散首先与风向和风速有密切关系。风向决定污染物输送的方向，风速大小决定对污染物的稀释能力。因此，根据一地的风向及风速的特点将能进行城市的功能分区。

1914年谢毛斯(A. Schmauss)提出，城市规划时，工业区应布置在主导风向的下风方向，居住区在工业区的上风方向的原则。这一原则已被各国采用。我国在20世纪60、70年代以前也用了这一原则。一些城市的居住区常受到工矿企业排出废气的污染。城市规划专家提出问题，经过分析认为这是由于谢毛斯的原则仅适用于常年吹一个方向的风，对季风气候的国家就不适用，因为季风是冬、夏风向相反，风频相当，也就是冬季是上风向，夏季则变为下风向。要研究适用季风区的城市规划，要避开冬、夏对吹的方向，提出最小风频的原则。这是基于从最小风频方向吹来的污染机会最少。因此，应该按当地最小风频的风向将主要工企业，布置在最小风频的方向，居住区在最小风频的下风向，以便尽可能地减少居住区的污染。季风区域城市规划最小风频的原则，已被采用。这种新的原则也丰富和发展了应用气候学的内容。

应用气候研究的成功率也就是直接转化为生产力，一般可达90%以上，甚至更高。这主要是研究的目标明确，针对性强，是直接解决生产和建设中提出的具体气候问题，而且在研究过程中与用户相互结合，将他们在规划、设计、生产和使用之中的难题融合到气候理论上，二者结合就会形成了新的方法和新理论。

气候与应用结合产生了新的生长点，形成了各种专业气候。专业气候是边缘性学科，它具有极强的综合性、理论性和应用性。如农业气候、建筑气候、水文气候、能源气候、交通气候、航空气候、航海气候、人类生物气候、旅游气候等，这些专业学科可以说明，应用气候学的发展已经从理论到应用，从大气候到小气候，从静态到动态，从一般分析到诊断分析，以及到模式的应用，形成了一个有机学科结构。

在专业气候中，除了分析研究应用气象要素温、湿、压、风和降水等，或者与之有关的统计指标、平均值、众数、较差、偏差和偏态系数、相关系数、频率、保证率等，进而建立统计模式、模拟和极大值的推算等之外，它还有其独特的气候指标值(专业对气候的具体要求的定量数值)，而不是单纯的气候要素，已涉及到与专业结合的因素形成新的概念，如度日、风压、雪压、覆冰、采暖温度、夏季空调室外计算干、湿球温度、夏季通风室外计算温度、日照间距、风能、积温等等。

度日，乃是计算热状况的单位，即在规定的室内温度(如我国采用18 ℃作为室内基准温度)与室外日平均气温的差值。一天内，室外平均气温低于或高于规定的室内温度，每一偏差度数即为1度日。度日数，则是在给定时间内(年、若干月)，各天度日数之和。度日又可分为暖度日，即按日平均低于基准温度的度数来计算的度日。它是用来表示建筑物采暖燃料消耗的一个度量；冷度日，即按日平均温度高于基准温度(25 ℃)的度数来计算度日。它是用来计算空调或冷藏所需的能量消耗。

风压，在建筑上有特定的含义，是比较空旷平坦地面上离地10 m高统计所得的50年一遇自记10 min平均最大风速。单位是kPa。

雪压，指当地一般空旷平坦地面上统计所得50年一遇最大积雪的自重，单位kPa。

覆冰，在大气温度接近或低于0 ℃的同时，有降水并被冻结在温度接近或低于0 ℃的物体

上的白色透明或不透明的冰层。若覆冰是导线，则称为导线覆冰。在气象部门将覆冰称为电线积冰或电线结冰。

采暖温度，采暖是使室内获得热量并保持一定温度，以达到适宜的生活或工作条件。采暖的界限温度是采用日平均气温≤5 ℃和≤8 ℃。将采暖界限温度的起止日期间的时段称为采暖期。采暖界限温度 5 ℃适用于一般民用建筑和生产厂房；8 ℃适用于要求较高的民用建筑。采暖区的划分是将累年日平均气温稳定≤5 ℃的日数，大于或等于 90 天的为集中采暖区；将累年日平均气温稳定≤5 ℃的日数为 60～90 天和累年日平均气温稳定≤5 ℃的日数不足 60 天，但稳定≤8 ℃的日数大于或等于 75 天者为采暖过渡地区；在集中采暖区和采暖过渡地区之外的地区为非集中采暖区。

夏季空调室外计算干、湿球温度。采用历年平均不保证 50 小时的干、湿球温度。所谓室外指的是自由大气状况即气象站观测资料。

夏季通风室外计算温度，是历年最热月 14 时的平均气温的平均值。

日照间距。建筑合理间距是全年每天都应有的最低限度的日照时间。规定日照标准为按当地冬至日住宅底层满窗日照不少于 1 小时的要求计算房屋间距。

风能。气流在单位时间内流过单位截面所具有的能量。

积温是完成某一发育时期或全生育期要求一定的热量积累，即在一定时间内逐日平均气温的总和。在农业气象中，常用活动积温和有效积温。活动积温是作物全生长期或某个发育时期内活动温度高于作物生长下限温度的日平均温度的总和；有效积温是作物全生育期或某个发育时期内有效温度(活动温度与作物生长下限温度之差)的总和。

长期以来，作为应用气候服务的面还不够宽，离客观需要和深层次的探索仍有一定差距。因此，将来还会有新的理论新概念不断地形成。

第二章 太阳能、风能与气候

自然界中能源的种类非常多，人们从不同的角度将能源分成了不同的能源类型。

按其能源的来源可分三类：一类为来自太阳辐射的，除了直接太阳辐射能之外，由太阳能间接产生的风能、水能、海洋能、生物质能以及蓄存一定历史期太阳能量的煤炭、石油、天然气等；第二类为来自地球本身的能量，一种是以热能形式储存于地球内部的地热能，如地热，另一种是地球上铀、钍等核燃料所具有的能量，即核能；第三类为月球和太阳等天体对地球的引力，而以月球引力为主所产生的能量，如潮汐能。

如果按其在自然界里形成的方式分类，可以分为一次能源和二次能源。

所谓一次能源是在自然界现成存在的，并可直接取得的能源，如煤炭、石油、天然气、水能、太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、核能等；所谓二次能源，即由一次能源经过加工、转换成另一种形式的能源产品，如电力、蒸汽、煤气、焦炭、热水、汽油、煤油、柴油等石油制品。

在一次能源中，人们根据各种能源的开发利用情况，又分为两大类，一类为可再生能源，是指在自然界可以不断再生并有规律地得到补充的能源。如太阳能、风能、水能、海洋能、潮汐能、生物质能等；另一类为非可再生能源，是指经过亿万年形成的，随着人类的大规模开发和长期利用，总的数量逐渐减少，而无法恢复的能源，如煤炭、石油、天然气和核能等。

可再生能源也称新能源。其实，新能源并不新，从人类使用能源的历史来看，太阳能、风能、生物质能已有几千年的利用历史。但是，由于其在历史上的利用规模小，局限性大，只是在现代科学技术的不断发展、人们对过去传统的利用方式改变了以后，赋予它许多新的技术，才变成了新能源。

非可再生能源又称常规能源。这是从经济角度上的称谓，是指在不同历史时期和科学技术水平下，被人们广泛使用的能源。

太阳能虽然源自太阳，但地球上实际得到的太阳辐射，已因为大气层中各种气体和悬浮物质的吸收、散射以及云层的反射、遮蔽等作用而比大气上界的太阳辐射削弱了不少，而且光谱成分、辐射强度等都发生了变化。因此，太阳能与天气气候有密切的关系。

我国制定的《新能源和可再生能源发展纲要》(1996～2010)在导言中提到："我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭约占商品消费构成的 76%，已成为我国大气污染的主要来源。大力开发太阳能、风能、生物质能、地热能和海洋能等新能源和可再生能源利用技术将成为减少环境污染的重要措施之一。"

《纲要》中提出，"在今后 15 年，新能源和可再生能源的总目标是：提高转换效率，降低生产成本，增大在能源结构中所占比例"。所以要发挥太阳能、风能等可再生能源的作用，这将对我国经济、社会和环境持续协调发展起到重要的作用。

第一节 太阳能、风能的优点和不足

一、太阳能、风能的优点

(一)永久性能源

太阳总是以不变的光芒射向大地,辐射出巨大能量。太阳能来自太阳上氢核的聚变反应。太阳内部存在着大量氢,在碳、氮的参与反应下,不断地进行着热核反应,从而释放出巨大的光和热,这就是太阳能的来源。

太阳不停地向周围空间放射出巨大的能量,其总量平均达3.865×10^{26} J/s,相当于燃烧1.32×10^{16} t/s 标准煤所放出的热量。地球上所接收到的能量仅是太阳射出的总量的 22×10^{-8},尽管如此,每秒钟也有 1.765×10^{17}J 之多,折合成标准煤也约有600×10^{4} t/s。

根据氢核发生聚变热核反应理论计算,得出氢核聚变产能区中氢核稳定燃烧的时间可在60×10^{8}a(年)以上,所以,可以用"取之不尽,用之不竭"来形容太阳能是永久性能源。

风是空气的水平运动,是地球表面接受太阳能不均匀而引起的气压在水平方向分布不均,造成了水平气压梯度力。这个力使空气产生了水平运动。所以从广义的太阳能来说,太阳能包括风能。太阳能是永久性能源,风能无疑亦是永久性能源。

(二)可以再生

上面已谈过,煤炭、石油、天然气在利用了之后,转变为其他形态的能源(二次能源)。而且无法再恢复到原来的形态,也就是说不可能再生。

地球是绕着太阳公转的,其公转轨道的平面和天球相交的大圆圈称黄道。由于地轴倾斜于黄道面,阳光投射到地面上的角度也就不同,于是形成了四季的变化,年复一年,循环不息。

地球在绕太阳公转时,同时还绕地轴自转,自西向东,每转一圈为一昼夜,日复一日永不停息。

这种有序的运动,有规律的补充,也就是人们今天利用了它,明天又可得到它,周而复始,所以称太阳能为可再生能源。

风能也是一样,全球范围的各种大规模气流统称为大气环流。大气环流是地球表面上最主要的冷热分布不均所形成的。冬季地面在蒙古高压控制之下,气流来自西伯利亚,干燥、寒冷,每当冷空气南下,其前部等压线密集,气压梯度很大,风速较大,风向偏北。夏季地面为热低压,高空为副热带高压控制,晴热、风小、风向偏南,并有西太平洋热带气旋的影响,带来大风和降雨。

这种冬、夏大气环流的变化也是有规律进行的。虽然由于海岸走向、地形的起伏、山脉走势等常常影响局地风速大小,风向改变,但气候是有一定规律的。一年中,风速也是能得到有规律的补充,故风能也属可再生能源。

非再生能源毕竟是有限的,随着开发利用,其贮藏量正在日益减少,甚至面临枯竭的危险。而再生能源随着人类的开发利用,总的趋势不会逐渐减少、枯竭,而是可以不断地得到补充,不断地再生。

(三)不污染环境

太阳能、风能同自然界中其他形式能量一样,都遵循着普遍的能量转换与守恒定律。

太阳能、风能转变为机械能或电能的过程，在整个工艺流程中，不产生大气、水体、固体废物等方面的污染物，也不会产生大的噪声污染。

由于大多数煤炭是通过直接燃烧方式来利用的，火力发电也是如此。根据国内外统计资料，火力发电每千瓦/小时的污染排放量大致是：CO_2 为 750 g，SO_2 为 6.1 g，NO_X 为 4.5 g，粉尘为 5.2 g。

若按我国到 2005 年风力发电装机容量为 100×10^4 kW，每年若按运行 3 000 小时(1 年为 8 760 小时)计算，年发电量可达 30×10^8 kW·h。那么相应地减少向大气排放 CO_2 为 2.25×10^6 t/a；SO_2 为18 300 t/a；NO_X 为 13 500 t/a；粉尘 15 600 t/a。

同时，利用太阳能和风能发电还可以减少煤炭资源的消耗。如按火电煤耗 350 g/(kW·h)计，一个 100×10^4 kW 机组的燃煤发电厂，平均年耗煤约为 110.9×10^4 t。

煤炭贮运、破碎、筛分过程中，由于设施和管理等原因，煤粉流失、煤尘飞扬和自然损失等，约占 2.5%，既浪费资源又污染大气。

太阳能和风力发电是依靠天然太阳能和风力资源为动力发电，既不排放能形成温室效应的气体，也不会产生破坏臭氧层和诱发酸雨的物质。因此，对周围环境不会造成污染，还可起到利用自然再生能源，节约非再生能源的作用。同时，也保护生态环境，获得改善环境的效益。

(四)无需运输

我国电力生产按年发电量计算，煤电约占 82%。

我国煤炭产地有 70%以上集中在内蒙古、山西、陕西等地区，水资源分布在西南地区，而煤炭的消费地区又主要集中在东北、华东和华南，北煤南运，西煤东调，运输量大，距离长，给铁路运输带来了很大的麻烦。

太阳能、风能资源就地可取，不要运输。只要资源达到一定数量，可以建立风电场、太阳能电站，其资源就会源源不断地“免费”供应，而且不受任何控制与垄断。

二、太阳能、风能的不足

上面主要谈到的是太阳能和风能的优越性，但是太阳能和风能还存在着很大的弱点，使它不能与其他能源相比拟。

(一)能量密度低

尽管太阳不停顿地向四周放射出巨大的能量(据估计，地球上每天接收到的太阳辐射能约为 4×10^{15}kW·h，相当于2.5×10^{12} 桶石油)，然而，地球表面积很大，每单位表面积所能接收到的太阳辐射很小，能量不集中，形成能量密度低，一般每平方米仅数百瓦。晴天情况下，每天每平方米面积才能获得 8 kW·h 左右能量，所以要把如此低的能量收集起来达到一定的功率，加以利用，必须具有相当大的受光面积的装置，给太阳能利用带来了很大的困难。

风能取决于空气密度，在标准状况下，空气密度仅是水的密度的 1/773，在相同流速下，要获得与水能同样大的功率，风轮直径要相当于水轮的 27.8 倍。而且，还要达到一定的风速才可利用。如 3 m/s 以下风速不能利用。所以风能密度也是很低的。要想采集到足够大的功率，必须加长风轮直径，风轮直径长度加长是有限的，也给风能利用带来很大困难。

(二)稳定性差

太阳能不仅随季节和昼夜的变化而变化，而且还受云量的多少、海拔高度、地理纬度的高低的影响而在变化。

风能也是一个随机变量，它受天气变化、地形、海陆等许多因素的影响，虽有一定规律可循，但其强度无时无刻都在不断的变化中。

太阳能、风能这种不稳定性，给大规模的利用带来不利。随着太阳能、风能技术取得新进展，全世界将竭力遏制温室气体排放。政府制定了《新能源和可再生能源发展纲要》(1966～2010)和一些开发新能源的优惠政策等。所以太阳能和风能正日益成为切实可行的替代能源不断向前发展。

第二节　太阳能资源及其利用

一、太阳辐射能

太阳是距地球最近一颗恒星。它是一个硕大炽热的球体，直径约 139×10^4 km，是地球直径的 109 倍。它的体积为 1.42×10^{21} m^3，是地球的 130×10^4倍。质量 1.982×10^{27} t，比地球大 33×10^4 倍，而它的密度仅是地球的 1/4。

太阳的热量也是非常巨大的。它的表面温度达到 6 000 ℃。在那里，不论什么东西都可转化为气体。其中心温度更高，约有 15×10^6℃。太阳内部不停顿地进行热核反应。实际上太阳是一座在连续不断进行核聚变的反应堆。

太阳的大气结构，由表及里可划分为日冕层、色球层和光球层三个层次。其内部结构大体可分为产能核心区，辐射输能区和对流区这样范围非常广阔的三个区带(图 2.2.1)。

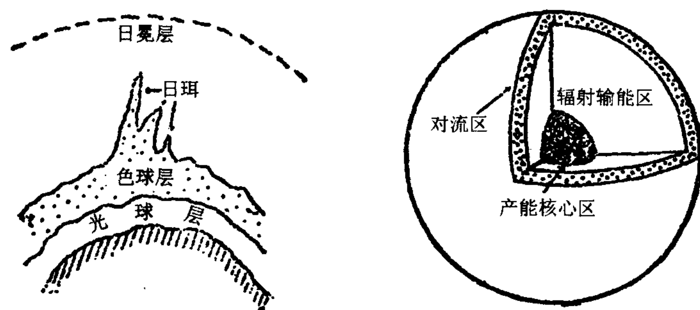


图 2.2.1　太阳的大气及内部结构示意图

太阳的内部温度在 13×10^6～15×10^6℃之间，中心密度很大，为160 g/cm^3，相当于水银密度的 12 倍，内部压强相当于303 975×10^{11}hPa 。在这样的高温、高压、高密度的条件下，构成它内部的主要物质——氢、氦、碳、氮等化学元素，势必要分离为电子和原子核。当原子核受到质子和中子等高能粒子的轰击后，就会发生蜕变，由一种元素转变为另一种元素及其他物质。它可以使物质蕴藏的能量部分地释放出来，这种蜕变过程，叫热核反应。太阳的能量来源，正是这种热核反应的结果。从理论上计算，1 个氢原子核的质量是1.00728原子质量单位，4 个氢原子核的总质量为4.292原子质量单位，它们蜕变为一个氦原子核的质量是4.0015原子质量单位，这种变化亏损的质量为0.0276原子质量单位。据爱因斯坦提出的相对论原理，以公式$E=mc^2$计算，1 g氢裂变为氦所亏损的质量是 0.0069 g，相应的能量是6280.2×10^8 J。1 kg 氢变为氦，

所产生的能量就相当于燃烧 2×10^4 t 煤所得的全部能量。太阳内部每秒约有 5.64×10^8 t 氢变为 5.6×10^8 t 氦，其余的 4×10^6 t主要变为太阳能辐射出来，由此可见其能量之巨大！

太阳不停顿地输出能量，每分钟约为 234.46×10^{26} J，相当于每分钟烧掉 79.2×10^{16} t 标准煤所放出的热量。尽管太阳是一个非常活跃的星体，在太阳大气层中也经常发生不规则的，时而活跃，时而平静的"太阳活动"。但对于实际应用来说，太阳的能量输出量仍可作为一个常数。

日地距离遥远，太阳与地球二者尺度悬殊，地球所能接受到的能量仅是太阳发出总量的 22×10^{-8}分之一，即使这点能量，其绝对量也能达到每分钟有 105.9×10^{17}J 之巨，折合标准煤约 36×10^7万 t。

现将太阳巨大的能量与地球上其他能源作比较。从地球内部传送到表面的热量，仅占太阳能的 22×10^{-3}，其绝对数 1 年总计不过 2.09×10^4 J/cm²。月亮在满月时，月球反射太阳的辐射能则更少，仅占太阳辐射的 1/133 000。由此可见，太阳能是地球最主要的能量来源。

二、影响太阳辐射的因素

(一)天文因素

1. 日地距离影响

地球绕太阳公转，其轨道呈椭圆形，因此，太阳与地球之间的距离就不是一个固定的数值。大致在 1 月 3 日前后，日地距离最近，称近日点，在 7 月 4 日左右，日地距离最远，称远日点。这两个点极限距离有远近 3%的变化。

日地距离不同必然对到达地面的辐射能量有影响，大概引起辐射能在 1 年中有 7%(比较平均值±3.5%)的变化。因此，不同日期测到的日射值是不能简单相比的，一般统一订正到日地平均距离进行日射的计算。

2. 季节变化的影响

季节的变化也影响到达地面的太阳辐射量。黄道面与天赤道的夹角为 23°27′。黄道与天赤道相交于两点，一点叫春分点，一点叫秋分点，如图 2.2.2。

由图可见，从天极(P)按反时钟方向，黄道从天赤道以南穿到天赤道以北时的交点为春分点(γ)，黄道从赤道以北穿到赤道以南的交点为秋分点(ω)。黄道上与春分点相距 90°处，太阳赤纬达最大值($\delta=23°27'$)，该点叫夏至，和春分点相距 −90°处，太阳赤纬达最小值($\delta=-23°27'$)，该点叫冬至。在二至和二分的基点上形成四季。天文学上，将春分到夏至称为春季，夏至到秋分称为夏季，秋分到冬至为秋季，冬至到春分为冬季。季节的变化，实际上是地球在公转轨道上的位置变化，如图 2.2.3。由于地球位置不同，太阳高度，日照时间长短不同，到达地面的太阳辐射量也就不同。

一般来说，大气层厚度在 50 km 以下，但对地面天气有直接影响的大气层厚度约 30 km，由于太阳光入射的路径不同，所以实际通过大气层的厚度也不同。显然，通过大气层厚度愈大，大气对太阳辐射的吸收、反射和散射愈多。故而，夏季太阳高度大，太阳直射通过大气层厚度小，太阳辐射量大。相反冬季太阳高度小，太阳直射时通过大气层厚度大，太阳辐射量就小。

3. 昼夜长短影响

地球绕太阳公转的同时，还绕着地轴自东向西自转，自转 1 周为 1 天。地球自转时，永远是半个球面向着太阳，也就是昼半球；半个球面背着太阳为夜半球，就形成昼夜的变化。

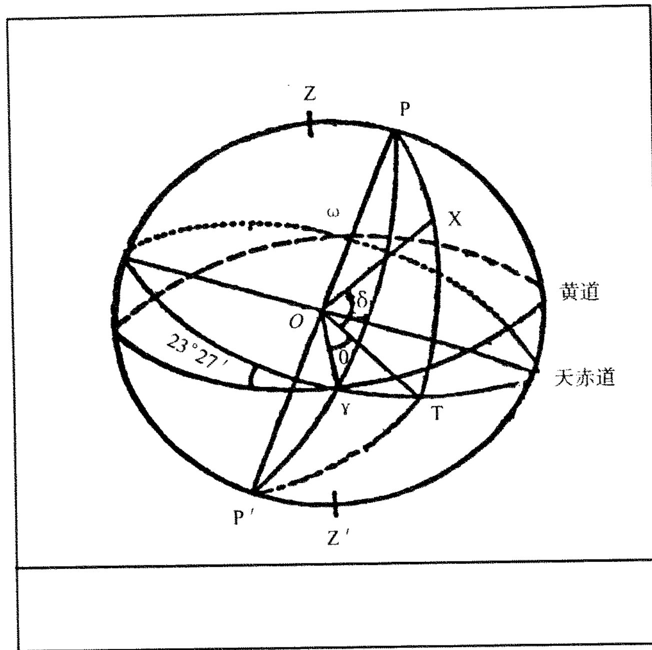


图 2.2.2　天体时角坐标

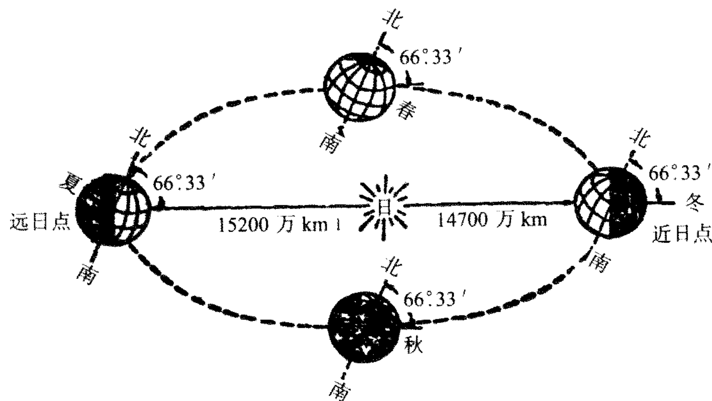


图 2.2.3　地球公转

地球自转轴和地球绕太阳公转的轨道平面有一个 66°33′的交角，这个交角不但造成地球上各地区的季节不同，也造成地球上昼夜长短不一样，由图可见当春、秋分时，太阳直射赤道，地球上各地(除极点外)的昼夜长短相等各 12 h(小时)，夏至时，太阳直射北纬 23°27′(即北回归线)，在赤道上仍为昼夜 12 h，在北极圈以北为永昼无黑夜，在赤道与北极圈之间，昼长于夜，在赤道和南极圈之间夜长于昼，南极圈以南地区为永夜无白昼。冬至时，正好与夏至相反，太阳直射南纬 23°27′(即南回归线)，南极圈以南为永昼无黑夜，北极圈以北为永夜无白昼(图 2.2.4)。

由于太阳直射点南北摆动，在北半球夏季白天时间增长，夜间时间减短；冬季白天时间减

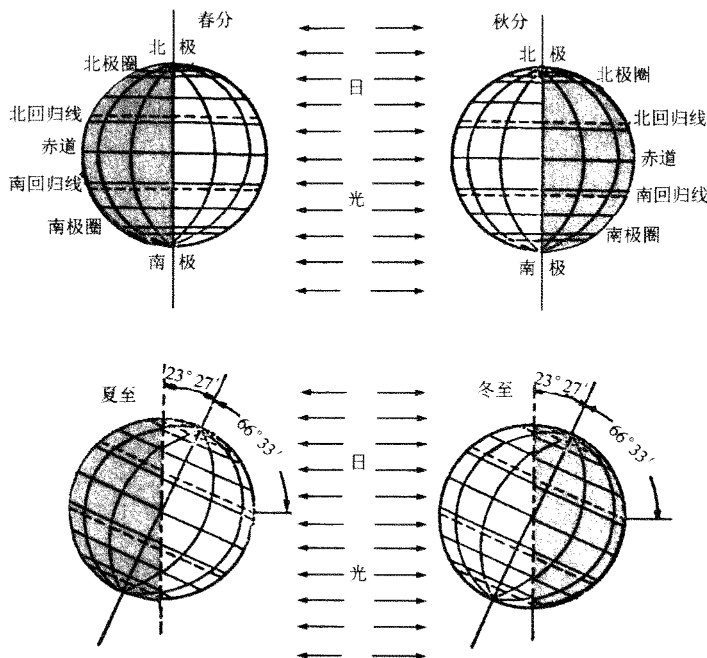


图 2.2.4 地球上四季昼夜长短变化

短,夜间时间增长。这样,在夏季白天时间长太阳辐射量就多;冬季白天时间短,太阳辐射量就少。

(二)地球-大气系统因素

太阳辐射能是地球-大气系统的主要能量来源。在地球-大气系统内部,也相互进行着辐射能量的交换。

1. 太阳辐射

太阳是以电磁波形式传播能量,一般把这种电磁波能量称辐射能或简称辐射。太阳光就是一种人眼可见的电磁波。电磁波的范围很宽,从波长等于 $10^{-10}\mu m$ 到波长几公里的无线电波都属于电磁波范围。其间有宇宙射线、γ 射线、X(伦琴)射线、紫外线、可见光线、红外线、微波、无线电波、长电振荡等,如图 2.2.5。

太阳、大气及地球辐射的波长范围基本上在 0.1～120μm,也就是紫外线、可见光和红外线区间。

太阳向外发射能量,称为太阳辐射。太阳辐射有 4 种:太阳光辐射,即太阳大气发射出来的连续光谱,是由不同波长组成的一条连续光带;太阳热辐射,即太阳发射光辐射的同时,也向地球辐射热量;太阳射电辐射,是太阳的电磁波辐射中的无线电部分;太阳微粒流辐射,是太阳发射许多不同种类不同性质的微粒,称为微粒流辐射。影响太阳能的变化主要是太阳的光辐射和热辐射。

2. 地球-大气系统辐射和热量平衡

到达地球的太阳总辐射量由两部分组成,有直接辐射,是通过大气圈直接到达地面的太阳辐射量;有散射辐射,是由大气中的空气分子、水汽、浮悬杂质所散射的太阳辐射量。太阳总辐

射是两者的总和。

到达地球的太阳总辐射，被地球吸收的太阳辐射称吸收辐射，被地球反射出的称反射辐射。地球吸收太阳辐射的同时，也向大气和宇宙射出辐射称为地面辐射。太阳辐射又称短波辐射，地球和大气的辐射又称长波辐射。

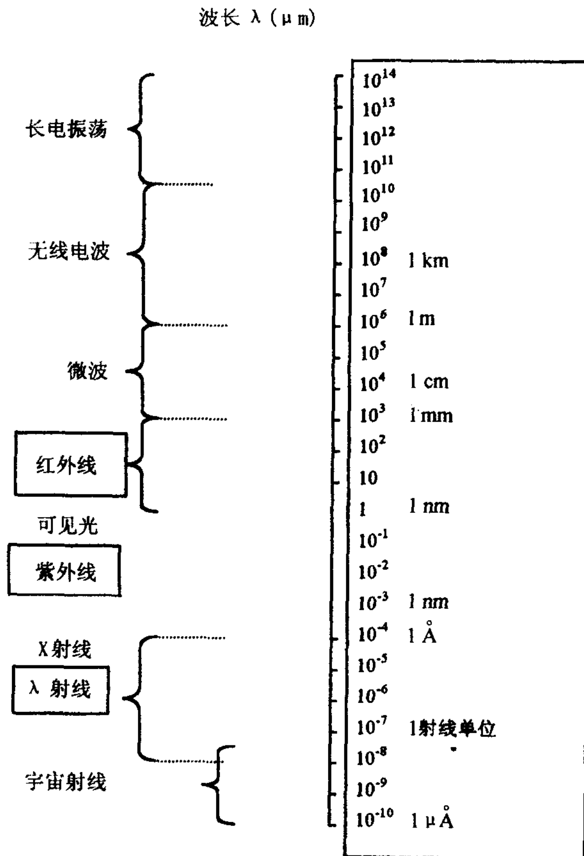


图 2.2.5 电磁波谱

地球大气中长、短波和吸收、散射等各种大气过程在大气及地球的热量平衡的作用，如图 2.2.6。

由图可见，假定大气上界入射辐射为 100，射出量中，经过大气时，被云、大气和地面反射和散射为 30，被云和水蒸气及其他吸收为 19，入射到地面(海洋和陆地)的太阳辐射为 51。

地球的失热，地面向上辐射长波为 21，地面显热湍流通量方式传给大气为 7，以潜热通量方式给大气为 23。经过大气 CO_2 等的吸收，大气向空间放射长波为 70。

总之，地面的热源是太阳，大气热源主要是地面。

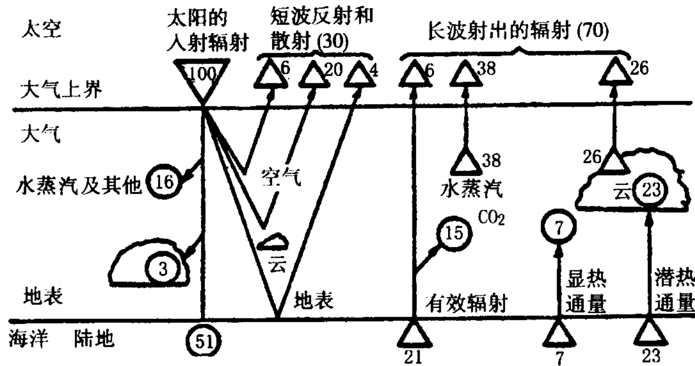


图 2.2.6　地球-大气系统辐射和热量收支

三、太阳能资源计算

(一)总辐射的气候学计算

到达地面的辐射总量,包括太阳直接辐射和天空散射辐射的总和,通常称为太阳总辐射。太阳能一般以太阳总辐射来表示。总辐射可以用仪器观测直接得到,但是由于太阳辐射的观测站太稀疏,全国目前尚不足 100 个,远不能满足太阳能开发利用的需要。解决方法,通常借助现有日射观测站的数据,与日射有关的气象要素建立统计模式,再利用这一模式求算无日射观测站的太阳辐射资料和数据。

影响太阳辐射的因子很多,重要有地理经纬度、海拔高度、云量、云状、大气透明度等。在日射台站实际观测到的总辐射值是这些因子的综合影响的结果。

计算总辐射的经验模式,可用下式函数表达

$$Q = Q_0 f(a,b)\phi(x), \tag{2.2.1}$$

式中 Q 为实际条件下的总辐射,用 $\mathrm{kW \cdot h/(m^2 \cdot a)}$ 或 $\mathrm{MJ \times 10^3/(m^2 \cdot a)}$ 等单位表示,Q_0为计算总辐射的基础值,$f(a,b)$为大气透明状况对总辐射的减弱函数,$\phi(x)$为天空遮蔽程度的减弱函数。

基础值 Q_0 值的选取有三种类型:

天文总辐射,研究地点大气上界单位水平面上单位时间内的辐射强度,即未受大气影响的太阳辐射。

晴天总辐射,表征只受大气透明度影响而未受云层影响的太阳辐射。它是研究地点实测的总辐射的最大值。

理想大气总辐射,又叫干法大气。就其成分而言,除了无水汽和灰尘杂质外,它与实际大气并无区别。理想大气中使日射衰减的因子是臭氧、氧和二氧化碳的选择吸收以及空气分子的散射。

利用这三种类型的基础数据作为自变量,分别与总辐射建立回归方程,其系数项和常数项的空间分布的稳定性及相对误差均相当接近。原因可能是这三类基础数据的月总量在各纬度上的分布趋势基本一致。

根据计算结果,三种不同的基础数据计算出的总辐射空间分布趋势基本相同,所以利用任一基础数据计算总辐射都是可行的。

目前，国内外公认的计算总辐射最优表达式为

$$Q = Q_0(a + bS_i), \tag{2.2.2}$$

式中，Q_0 为上述三种基础数据中的任一种类型，a、b 为常数，用各地区的日射观测站资料拟合确定，S_i 为日照百分率。

关于 Q_0 的三种基础值，利用太阳常数，可以比较精确地计算出各季节不同地理纬度的天文辐射日、月总量。左大康等(1963)年利用乌拉英禾夫方法得出了我国平原和高原两大区域的晴天状况下的总辐射纬度平均值。王炳忠等(1996)计算了我国每隔二个纬度距若干等压面上的理想大气中太阳总辐射月总量。这些计算都给出了查算表，以便计算时查用。

太阳辐射单位的变化。过去曾采用过卡/(厘米^2·分)，现已废止。它与目前应用的kW·h和 J 等之间的换算关系如表 2.2.1。

国际单位制推行委员会规定，热、功、能量的单位采用 J。其定义为：1 牛顿的力作用于质点，使它沿力的方向移动 1 m 距离所做的功，称为 1 J(焦耳)，焦耳也可由电学单位来定义：即 1 安培电流在 1 欧姆电阻上 1 s 内所消耗的电能，称为 1 J。

卡的定义为：1 g 纯水在标准气压下，温度升高 1 ℃所需要的热量。

表 2.1.1 能量单位换算表

	焦耳 (J)	千瓦·时 (kW·h)	马力·时 (PS·h)	20℃ 千卡* ($kcal_{20}$)	英热单位 (Btu)
焦耳(J)	1	2.78×10^{-7}	3.78×10^{-7}	2.39×10^{-4}	9.48×10^{-4}
千瓦·时(kW·h)	3.6×10^{6}	1	1.36	8.61×10^{2}	3.41×10^{3}
马力·时(PS·h)	2.65×10^{3}	0.736	1	6.33×10^{2}	2.51×10^{3}
20℃ 千卡($Kcal_{20}$)	4.18×10^{3}	1.16×10^{-3}	1.58×10^{-2}	1	3.97
英热单位(Btu)	1055.06	2.93×10^{-4}	3.99×10^{-4}	2.52×10^{-1}	1

* 20 ℃千卡，即 1 kg 纯水，在标准气压下，温度从 19.5 ℃升高到 20.5 ℃所需要的热量

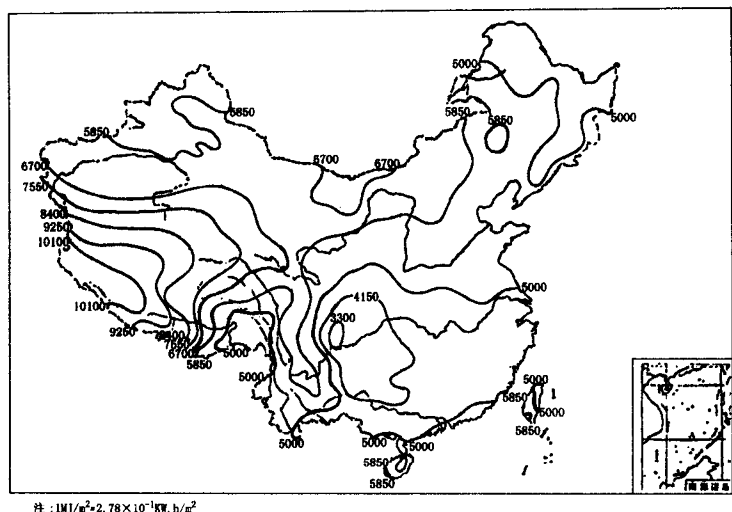
(二) 太阳能资源的分布和分区

1. 太阳能资源的地理分布

我国太阳辐射年总量的分布特点如图 2.2.7。

首先，从图上可以看出一个显著的特点，就是太阳能的高值中心和低值中心差不多处于同一个纬度上。最大值在青藏高原可达10 100 MJ/(m^2·a)。最小值在四川盆地东南部，年总辐射量还不到 3 300 MJ/m^2，仅是最大值的 1/3 左右。这样的分布形势，部分可归地为海拔高度和气候对总辐射的影响。

其次，由图还可以看出年总辐射的 5 850 MJ/(m^2·a)这条等值线，自大兴安岭西麓向西南，穿黄河沿青藏高原东侧到西藏东南，将全国分为东西二大部分，西部在5 850 MJ/(m^2·a)以上，东部在其以下。西部远离海洋，受海洋潮湿气流影响很小，全年气候干燥，中低云量较少，所以总辐射较大；东部以内蒙古东部和华北较大，在5 850～5 800 MJ/(m^2·a)之间，长江中下游与东北的总辐射量相当，约在5 800～4 150 MJ/(m^2·a)。广东沿海和台湾、海南沿海总辐射量都较大，在 5 800 MJ/(m^2·a)以上，在台湾和海南的西部可达 5 850 MJ/(m^2·a)以上，是东部总辐射最大区之一。在东部川黔地区为低值中心，这一低中心与世界上太阳能随纬度的分布规律相反，一般随纬度增高总辐射在减少。但这一地区出现川黔低中心，使总辐射随着纬度增



注：$1MJ/m^2=2.78\times10^{-1}KW.h/m^2$

图 2.2.7　我国太阳辐射年总量分布特

高而增加。这种南低北高的现象是因为该地区处于青藏高原的东麓背风坡，是南北两股气流绕流交绥的地方，天气系统活动频繁，云量较多，使直接辐射削弱，形成了低中心。说明了我国季风气候特点，太阳高度的差异，在这些地区不起主导作用。

2. 太阳能资源的分区

为了便于我国太阳能资源的开发利用，根据太阳能年总量的大小，将全国分为 4 个区，如图 2.2.8。区划的指标是总辐射年总量。

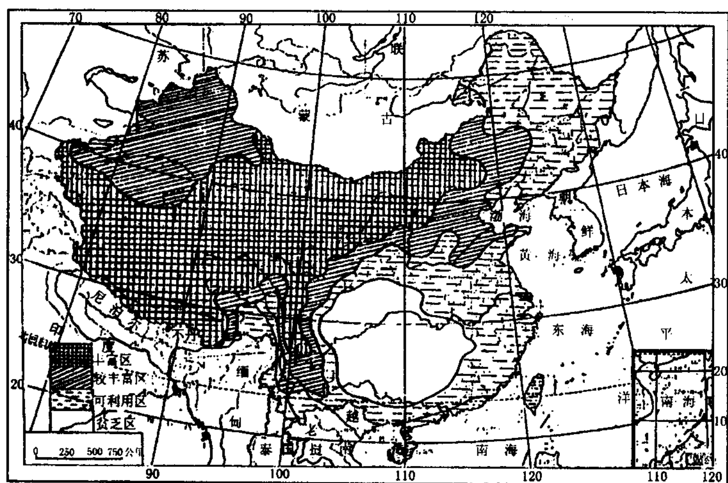


图 2.2.8　中国太阳能分区图

丰富区，太阳能总辐射在 17×10^5 W·h/(m^2·a)以上的地区，大致包括青藏高原、西北大部和内蒙古的中西部。这一地区全年中最大和最小可利用日数的比值较小，年变化较稳定，是太阳能资源利用条件最佳的地区。此外，在海南和台湾的西端也有一小区为资源丰富区。

较丰富区，$15\times10^5\sim17\times10^5$ kW·h/(m^2·a)，包括新疆的北部、东北西部、内蒙古东部、

华北大部、四川的西部至横断山脉的一部分、广州沿海部分以及台湾和海南的大部。该区太阳能资源仅次于丰富区，所利用时数的年变化还比较稳定，但在横断山脉及广东沿海地区最大与最小值的可利用日数之比值大于 2.0，所以季节性变化明显，这对太阳能利用带来了不利。

可利用区，太阳能资源在 $12\times10^5\sim15\times10^5$ W · h/(m^2 · a)，包括淮河流域、长江下游、东南沿海和两广的大部，该区月际最大与最小可利用日数之比值均大 2.0，也就是说，一年中可利用日数出现了明显的年变化，而且其中最小值出现的季节已不利于太阳能的利用，只有在最大值出现的季节可以利用。

贫乏区，太阳能资源在 12×10^5 W · h/(m^2 · a)以下，此区是我国太阳辐射资源最小的地区，包括云贵川的大部以及鄂西、湘西等。一般认为，在 1 天内有 6 小时以上的日照时间，这一天是可供太阳能利用的，否则没有多大的利用价值。该区中的重庆，冬季日照时数大于 6 小时的天数仅有 1～2 天，夏季 7、8 月日照时数大于 6 小时的天数在 18 天左右，其余月份均小于 9 天。

(三)太阳能资源季节变化

在我国，从冬到夏太阳高度逐渐增大，白昼时间不断加长，接受到的太阳总辐射能量也就加多，表现出明显的年变化。

冬季环流特征比较单一，全国辐射最小值的出现时间大都在 12 月，夏季受到东南季风和西南季风的影响，从初夏到盛夏多雨带由华南推移到华北和东北，致使总辐射最大值出现月份各地不大一致，华南出现在前汛期(5、6 月)和后汛期(8 月)双峰之间的 7 月，长江流域发生在梅雨后的 7 月份，华北和东北则分别发生在雨季前的 5 月和 6 月。反映出东部最大值出现时间随纬度增高而提前的规律。西部地区恰恰相反，随纬度增高而推迟，最大值出现月份昆明是 4 月，拉萨 5 月，西宁 6 月，乌鲁木齐为 7 月。

我国北部气候较为干燥，冬、夏太阳高度和昼长差异较大；南方气候湿润，各季太阳高度和昼长的差异较小。所以，总辐射的年变幅是从低纬度向高纬度增大的。这种变化表明，我国南部总辐射量年内分配比较均衡，而北部则向夏季集中。

(四)地形对太阳辐射的影响

1. 海拔高度的影响

在山区，太阳直达辐射随高度的增加而增大。由于水汽和灰尘主要分布在 2 000 m 以下的低层，这一层太阳直达辐射随高度增加较快，2 000 m 以上，随高度增加较慢。

太阳散射辐射随高度的增加而减小。这是由于大气中气溶胶质粒含量随着高度减小所致。

太阳总辐射的垂直变化，在晴天情况下，太阳直达辐射与散射辐射随高度增加分别是递增和递减。但太阳直达辐射在总辐射中所占的比重大，所以太阳总辐射还是随高度的升高而增加。这表明在山地、高地，比低地可以获得更多的太阳能资源。

太阳总辐射随高度的变化因季节不同而各异。在冬季，我国气候正处于干季，山区云雾较少，山顶的总辐射通常多于山麓。随着夏季风的到来，山区云雾增多，在各地雨水也增多则会出现山顶总辐射少于山麓的情况。山区有一个最大降水高度，该高度若在山顶高度以下，则山顶总辐射仍最大，而此高度以下总辐射随高度增加而递减。在山区太阳能资源的开发利用时，要注意这一特点。

2. 坡地太阳总辐射

在山区，坡地的坡向与坡度对太阳总辐射的分布有着很大的影响。通常，在坡度较小时，各

坡向的差异不显著，当坡度增大时，各坡地的辐射差异就十分显著。

坡地全年接受的太阳辐射总量，在赤道附近的纬度是东坡和西坡受热最多，南坡和北坡最少。在北半球，随着纬度增高，南坡上的太阳辐射总量增多，北坡上的太阳辐射总量在减少。受热最多的坡向逐渐向南移动，直到回归线以北的纬度，受热最多的都是南坡。无疑太阳辐射总量也是最多。反之，在偏北的坡地上，辐射总量随着坡度的增大而减小，坡向越北，纬度越高，减小也越快。因此，太阳能的采集面安放在有一定坡度的南坡为最佳。

山区地形是复杂的，四周地形对坡面的遮蔽往往是交错重叠的。这种遮蔽作用使得坡地的实际可照时数有所减少，并导致太阳直达辐射量减少。

四、太阳能的开发利用

从太阳能利用的方式来看，可分为太阳能的热利用和太阳能光电利用。

(一)太阳能热利用

太阳能热利用是将太阳辐射能转换为热能后使用。实现转换的器件为集热器。由于利用的目的不同，集热器及其匹配系统各不相同，就有不同名称。如太阳能用于炊事叫“太阳灶”，用于产生热水叫“太阳能热水器”，用于烘干叫“太阳能干燥器”等。

1. 太阳灶

从原理和结构上大致可以分为三类：第一类是闷晒式，又称箱式太阳灶。它是置于太阳光下长时间的闷晒，缓慢地积蓄热量。箱内温度一般可达 120～150 ℃，适合闷蒸食或作为保温器和医疗器具的消毒用；第二类是聚光太阳灶，它将较大面积的阳光聚集到锅底，使温度达到较高的程度，以满足炊事要求；第三类为热管式太阳灶，室外为自动跟踪的聚光式太阳灶，利用热管的蒸发和凝结作用，把热量传到室内。

我国是推广应用太阳灶最多的国家，已推广应用太阳灶几十万台。其中甘肃占 40%左右，河北、西藏、青海分别占 10%左右。太阳灶在太阳能丰富而能源短缺的地区，很受农牧民的欢迎。每台太阳灶的采光面积为 1.5～2.5 m^2，功率约700～1200 W左右。在甘肃永清县使用，年利用率普遍达 30%，年节柴 500～1000 kg，使用 2～4 年即可回收全部投资。太阳灶在西藏使用，经济效益更为明显。1 台 2 m^2 采光面积的太阳灶，一般每天可省燃料 7.5 kg，每年可使用 200 d，节柴 1500 kg，按西藏价格约合 260 元左右，所以西藏农牧民称太阳灶为“雅古都”(藏语好的意思)。西藏江孜县太阳灶普及率很高，由于大量推广太阳灶，该县燃料紧张短缺状况有了明显的缓解，牛粪还田增多，粮食获得丰收。

推广应用太阳灶对改善农村卫生条件及生态环境、节省砍柴割草的劳动等均是有益的。

太阳灶在推广应用上存在的问题是反射面的材料寿命太短，一般只有 2 年，这对使用者来说不够经济。

2. 太阳能热水器

这是太阳能热利用中具有代表性的一种装置，它的用途广泛，形式多样。供应生活用或工农业用的低温(40～60 ℃)热水的太阳能热水器，是一种最为成熟的太阳能利用技术，也是推广应用数量最多的太阳能利用装置。

太阳能热水器按结构可分为 5 种：(1)闷晒式热水器，它的太阳能闷晒盒内装有黑色塑料或金属的盛水胆，通过吸热使水胆内水温加热；(2)是管板式热水器，又叫平板集热器，它使水箱中的水通过集热器内循环而加温，水的循环是靠因温差密度不同而产生的流动完成的；(3)

是聚光式热水器，由聚光集热器构成；(4)是真空管式热水器，这是利用真空技术，减少热的对流损失。它受外界气温影响很小，全年可以利用；(5)是热管式热水器，这是利用管体的特殊结构和传热介质的蒸发与凝结作用，把热量从管的一端传到另一端。

我国累计推广应用太阳能热水器2003年底为5200万 m^2。其中90%是集体使用的热水器。家庭住宅使用的约10%。按全国家庭住宅计算，其普及率不到5%，但个别地区有很快的发展，如北京家用热水器超过10%。浙江舟山群岛地区家用热水器超过30%。山东也有十多万户使用太阳能热水器。

据测算使用1 m^2 的太阳能热水器每年可节约120 kg标准煤。

3. 太阳能干燥器

这是利用太阳能干燥农副产品的一种装置。我国农副产品的干燥，每年要消耗大量的常规能源。例如，干燥1 t红枣耗煤1 t，干燥1 t烟叶耗煤2 t，干燥1 t橡胶耗煤3 kg，干燥1 t谷物耗煤70 kg。据统计，我国每年来不及干燥而变质的谷物达 250×10^4～500×10^4 t，经济损失达4亿元。据不完全统计，全国已建成太阳能干燥器几百座，被干燥的产品有谷物、木材、花生、水果、黄花菜、辣椒、红枣、皮革、腐竹、烟草、果脯、中药材、橡胶等。

太阳能干燥器的投资回收年限，根据干燥物料价值不同及干燥器装置的不同，一般需2～4 a。

4. 太阳房

太阳房是利用太阳能采暖和降温的房子。太阳房可以分为主动太阳房和被动太阳房。

被动太阳房是指完全依靠建筑结构本身的吸热、隔热、保温和通风特性，不需要安装特殊的动力设备，利用太阳能达到夏凉冬暖的房屋。这种太阳房因人为的主动调节性差，故称被动太阳房。

目前我国兴建的绝大多数太阳房为被动太阳房。它不仅可以节约常规能源，而且运行管理极为方便。我国已建成几百栋被动太阳房约 180×10^4 m^2。以西藏、甘肃、北京为最多，天津、河北、内蒙古、辽宁、青海也较多。

被动太阳房建筑的投资一般比普遍建筑投资高15%～40%。事实证明，被动太阳房在我国的推广应用收到了明显的经济效益。如青海刚察县泉吉邮电所是我国较早建的一座被动太阳房，一直使用很好。当地海拔3301 m，冬季采暖期长达7个月。最冷时气温在−22～−15 ℃。在不使用辅助能源的情况下，太阳房内的温度一般可维持10 ℃以上。该房建于1979年，造价比当地普遍房屋略高一些，但每年能节省大量采暖用煤，经济效益明显。又如西藏阿里地区，太阳房建造比一般房屋投资增加37%，该地区采暖期为8个月，据统计每 1×10^4 m^2 建筑每年节省采暖费66万元。只要3年就可回收多投资的37%。北京采暖为4个月，太阳房建筑投资多增加24%，由于采暖期短，所以需要10～15a才能回收多增加的投资部分。

主动太阳房一般由集热器、传热流体、蓄热器、控制系统及适当的辅助能源系统构成。它需要热交换器、水泵和风机等设备。这种太阳房造价高，但是室温能主动控制。目前在一些经济发达国家，如美国、日本等已建筑了不少各种类型的主动式太阳房。

5. 太阳能致冷

利用太阳能致冷，国外多试用主动太阳房。我国1979年由中国建筑科学研究院空调所在北京棉纺三厂建造的太阳能空调房，使用面积64 m^2，房高4.1 m，平板集热器40 m^2，采用氨—水吸收致冷系统，致冷量 29.3×10^6 J/h。

6. 太阳热发电

太阳热发电是利用集热器把太阳辐射变成热能，然后通过汽轮机、发电机来发电。太阳能发电可分为高温发电和低温发电两大类。

高温太阳能发电，又称中央接受式的塔式发电。适用于大型发电系统。美国、日本、法国、意大利、西班牙等已建成几千瓦至上万千瓦的中央接受式热电站。世界上最大的太阳能热发电站是美国的“太阳1号电站”功率为10^7 W。这些试验电站每千瓦的建设投资达$1\times10^4\sim2\times10^4$美元。主要是占投资1/2的定日镜造价太高。

低温太阳能发电，又称分布式电站。20世纪70年代末，我国在上海、天津各建了一套功率为1000 W的低温和小型塔式发电模拟装置。

由于太阳能热发电设备庞大、造价高，短期内尚难商品化。

(二)太阳能光电利用

太阳能的光电利用，是指太阳的辐射能光子通过半导体材料转变为电能的过程，通常叫“光生伏打效应”，太阳能电池就是利用这种效应制成的。

1. 太阳能光发电站

近年来，一些发达国家先后建立起来这类发电站，如美国、法国、德国、意大利、丹麦、希腊、沙特阿拉伯、哥伦比亚等。目前世界上最大的太阳能光发电站是美国加州萨克拉门托电站，功率为1.2×10^6 W。

2. 太阳能电池

太阳能电池是太阳能利用中最重要的应用之一，也是发展最快的技术之一。单晶硅太阳能电池，目前仍在太阳能电池市场占主导地位。它的光电转换效率最高，达到14%，然而生产成本昂贵，影响了发展；多晶硅电池要比单晶硅电池便宜，但效率只有12%。随着薄膜太阳能电池采用，它的效率只有9%，但它可以用高度自动化和比较廉价的方法生产，成本会大幅度下降。不久后有些可从现在每千瓦4000美元降至每千瓦1000美元。到时太阳能电池将会有一个大的发展。

太阳能电池应用面很广，在通信领域有：微波中继站、光缆通讯台站、无线寻呼台站、卫星通信地面站、卫星电视地面站及电视差转台、农村程控电话交换机电源、军队通信系统等；其他工业领域有：铁路及公路信号电源系统、航标灯和灯塔电源、气象及地震台站电源系统、石油管道及水闸阴极管道保护系统、森林防火无线报警系统等；农业及农村电气化领域有：独立光伏电站、光伏户用电源、太阳能照明灯、光伏水泵系统、风、光互补发电系统、电围栏、农用黑光灯等。

国家为了解决西藏自治区一些县的供电问题，先后在西藏建成了几座容量从10 kWp、25 kWp、100 kWp的独立光伏电站，其海拔高度都在4700 m以上。

到2003年底全国已安装光伏电池约5.5万kWp。

第三节 风能资源计算和风电场选址

一、风的形成

(一)大气环流

风的形成是空气流动的结果。空气流动的原因是地球绕太阳运转，由于日地距离和方位不同，地球上各纬度所接受的太阳辐射强度也就各异。在赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳

辐射强度强，地面和大气接受的热量多，因而温度高。这种温差形成了南北间的气压梯度，等压面向北倾斜，空气向北流动。

由于地球自转形成的地转偏向力的存在，这种力就叫作科里奥利力，简称偏向力或科氏力。在此力的作用下，在北半球，使气流向右偏转，在南半球使气流向左偏转。所以，地球大气的运动，除受到气压梯度力的作用外，还受地转偏向力的影响。

地转偏向力在赤道为零，随着纬度的增高而增大，在极地达到最大。

当空气由赤道两侧上升向极地流动时，开始因地转偏向力很小，空气基本受气压梯度力影响，在北半球，由南向北流动，随着纬度的增加，地转偏向力逐渐加大，空气运动也就逐渐的向右偏转，也就是逐渐转向东方。在纬度30°附近，偏角达到90°，地转偏向力与气压梯度力相当，空气运动方向与纬圈平行，所以在纬度30°附近上空，赤道来的气流受到阻塞而聚积，气流下沉，形成这一地区地面气压升高，就是所谓的副热带高压。

副热带高压下沉气流分为两支，一支从副热带高压向南流动，指向赤道。在地转偏向力的作用下，北半球吹东北风，南半球吹东南风，风速稳定且不大，约3～4级，这是所谓的信风，所以在南北纬30°之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上升气流，构成了一个闭合的环流圈，称此为哈得来(Hadley)环流，也叫做正环流圈。此环流圈南面上升，北面下沉。

另一支从副热带高压向北流动的气流，在地转偏向力的作用下，北半球吹西风，且风速较大，这就是所谓的西风带。在60°N附近处，西风带遇到了由极地向南流来的冷空气，被迫沿冷空气上面爬升，在60°N地面出现一个副极地低压带。

副极地低压带的上升气流，到了高空又分成两股，一股向南，一股向北。向南的一股气流在副热带地区下沉，构成一个中纬度闭合圈，正好与哈德来环流流向相反，此环流圈北面上升、南面下沉，所以叫反环流圈，也称费雷尔(Ferrel)环流圈；向北的一股气流，从上空到达极地后冷却下沉，形成极地高压带，这股气流补偿了地面流向副极地带的气流，而且形成了一个闭合圈，此环流圈南面上升、北面下沉与哈德来环流流向类似的环流圈，因此也叫正环流。在北半球，此气流由北向南，受地转偏向力的作用，吹偏东风，在60°～90°N之间，形成了极地东风带。

综合上述，在地球上由于地球表面受热不均，引起大气层中空气压强不均衡，因此，形成地面与高空的大气环流。各环流圈伸展的高度，以热带最高，中纬度次之，极地最低，这主要是由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球自转偏向力的作用下，形成了赤道到30°N环流圈(哈德来环流)、30°～60°N环流圈和60°～90°N环流圈，这便是著名的“三圈环流”如图2.3.1。

当然，所谓“三圈环流”乃是一种理论的环流模型。由于地球上海陆分布不均匀，因此，实际的环流比上述情况要复杂得多。这里给出北半球1月多年平均海平面气压(地面气压是在各个地面气象站观测的，而气象站的海拔高度各不相同，无法进行对比，必须将各个气象站所观测的气压，用统一的方法订正到海平面上的气压，称海平面气压)分布如图2.3.2。

由图可见，在30°N处绕北半球一周的地带，是一个高压地带，与图2.3.1中哈德来环流北界的下沉气流区相吻合，60°N地带为低压活动区与图2.3.1中北边两个环流圈之间的上升气流带相吻合。所以三圈环流模型还是反映了大气环流的基本情况，对于南半球，由于地表较均匀，其大气环流更接近上述理论环流模型。

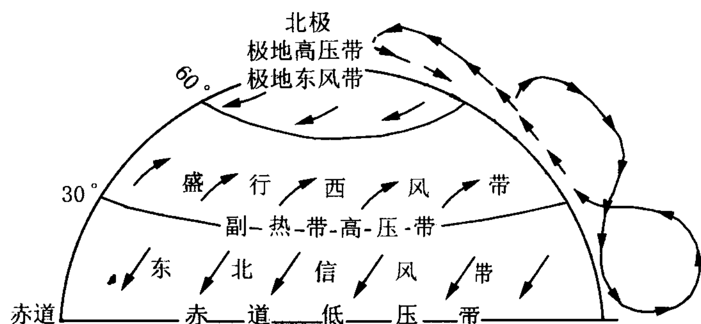


图 2.3.1 三圈环流示意图

（二）季风环流

在一个大范围地区内，它的盛行风向或气压系统有明显的季节变化，这种在 1 年内随着季节不同，有规律转变风向的风，称为季风。季风盛行地区的气候又称季风气候。

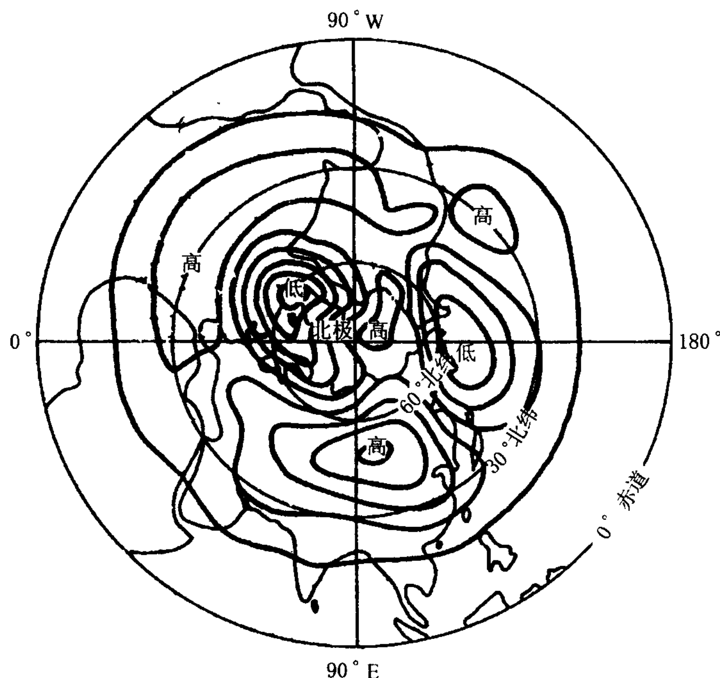


图 2.3.2 北半球 1 月多年平均海平面气压分布图

季风明显的程度是用一个定量的参数来表示的，称为季风指数。如赫洛莫夫，他是根据地面冬、夏盛行风向之间的夹角来表示的，当夹角在 120～180°之间，认为是属季风，然后用 1 月和 7 月盛行风向出现的频率相加除 2，即 $I=(F_1+F_7)/2$ 为季风指数，当$I>40\%$为季风区，I 在 40%～60%为较明显季风区，$I>60\%$为明显季风区，如图 2.3.3 中 1、2、3 区。由图可见，全球明显季风区主要在亚洲的东部和南部，东非的索马里和西非几内亚。季风区有澳大利亚的北部和东南部，北美的东南岸和南美的巴西东岸等地。

亚洲东部的季风主要包括我国的东部，朝鲜、日本等地区。亚洲南部的季风，以印度半岛最

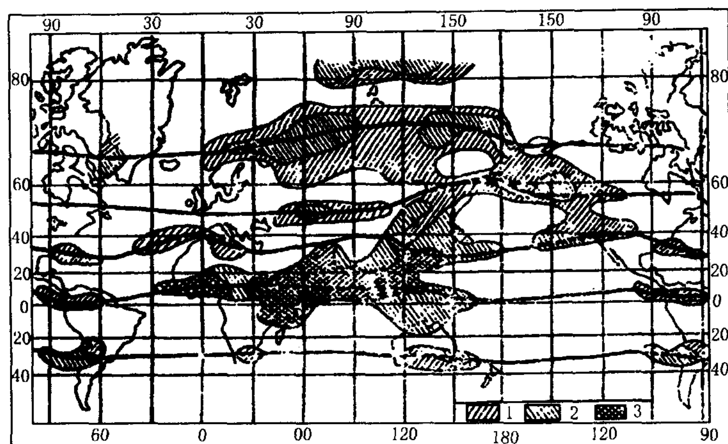


图 2.3.3 季风的地理分布

为显著，这是世界闻名的印度季风。

1. 我国季风环流的形成

我国位于亚洲的东南部，所以东亚季风和南亚季风对我国天气气候变化都有很大影响。

形成我国季风环流的因素很多，主要是由于海陆差异，行星风带的季节转换以及地形特征等综合形成的。

(1)海陆分布对我国季风的作用

海洋的热容量比陆地大得多。冬季，陆地比海洋冷，大陆气压高于海洋，气压梯度力自大陆指向海洋，风从大陆吹向海洋；夏季则相反，陆地很快变暖，海洋相对较冷，陆地气压低于海洋，气压梯度力由海洋指向大陆，风从海洋吹向大陆，如图 2.3.4。

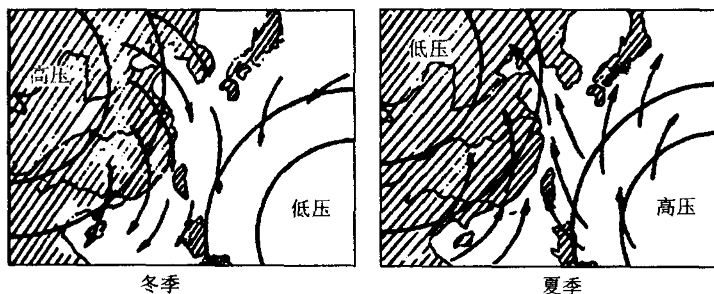


图 2.3.4 海陆热力差异引起的季风示意图

我国东面和南面濒临海洋，南临印度洋，冬、夏的海陆温差大，所以季风明显。

(2)行星风带位置季节转换对我国季风的作用

地球上存在着五个风带，从图 2.3.1 可以看出，信风带，盛行西风带，极地东风带，南半球和北半球呈对称的分布。这五个风带，在北半球的夏季都向北移动，而冬季则向南移动。这样冬季西风带的南缘地带，夏季可以变成东风带。因此，冬、夏盛行风就会发生 180°的变化。

冬季我国主要在西风带影响下，强大的西伯利亚高压笼罩着全国，盛行偏北气流。夏季西风带北移，我国在大陆热低压控制之下，副热带高压也北移，盛行偏南风。

(3)青藏高原对我国季风作用

青藏高原占我国陆地的1/4,平均海拔在4 000 m以上,对应于周围地区具有热力作用。在冬季,高原上温度较低,周围大气温度较高,这样形成下沉气流,从而加强了地面高压系统,使冬季风增强;在夏季,高原相对于周围自由大气是一个热源,加强了高原周围地区的低压系统,使夏季风得到加强。另外,在夏季,西南季风由孟加拉湾向北推进时,沿着青藏高原东部的南北走向的横断山脉流向我国的西南地区。

2. 我国季风气候区风资源变化

季风环流对风能的影响。首先反映在风向的变化,其次是风速的变化。

冬季是冷高压(一般称为蒙古高压)控制着全国气流,我国位于高压的东和东南侧,每当冷高压南下,全国大部分地区盛行风向都是偏北,只视其相对于高压中心的位置不同而实际偏北的方向有所区别。东北大部分地区和内蒙古东部及华北北部以西北风为主,松嫩平原以西风为主。黄河中下游沿海以东北为多。内陆以北和西北为多。东南沿海多为东北风;云南东部和广西西部多东南风,云南西部多西南风。青藏高原多偏西风。西北地区,新疆西部多西北风,东部则为偏东风,西北其他地区多为偏北风。

由于冬季南北温差大,气压梯度大,风速就大,1月平均风速内蒙古北部可达6 m/s以上,由此向南风速逐渐减小,到三北北部风速在2 m/s左右。沿海风速也在6 m/s以上,由沿海向内陆风速也渐减小到2 m/s左右,到四川盆地风速仅1 m/s。青藏高原上风速在2～4 m/s之间,新疆几个向西的山口风速也可达6 m/s以上。台湾、海南的西部风速在5 m/s左右,比东部的2 m/s大3 m/s。

夏季,大陆为热低压盘踞,风从海上吹向大陆,盛行风向以南风为主。从辽东半岛直至台湾海峡沿海地区盛行东南风。由东北平原经华北到华南和云贵高原多吹南至东南风。青藏高原南部盛行东南风,北部为东和东北风。新疆东部为东北风,北部为西和西北风。

夏季,大陆热低压气压梯度小,风速不大,是一年中风速最小的季节,7月平均风速内蒙古北部为4 m/s,比1月小了2 m/s,沿海为3 m/s左右,比1月也小了2 m/s左右。全国大部分地区风速仅为2 m/s左右。

春、秋季是转换季节,春季大陆增温迅速,冷高压势力衰退。全国风向不如冬季风稳定少变,虽不少地区仍以偏北风占优势,但风的偏南分量显著增加。由于冷暖气团活跃,气旋活动频繁,风速较大,在三北地区一般是一年中风速最大的季节,东南沿海和两广地区春季风速小于冬季。秋季由于冬季风来得迅速,且稳定维持,不像春季中由夏季风替代冬季风时的进退拉锯形势,因此,秋季地面已为冬季风的形势,夏季风的势力大都退出大陆。各地又多吹偏北风,风速比夏季大。但在东南沿海及两广地区秋季由于受热带气旋的影响,一些地区秋季风速比春季大些。

(三)局地环流

1. 海陆风

海陆风的形成与季风相同,也是大陆与海洋之间的温度差异的转变引起的。不过海陆风的范围小,以日为周期,势力也弱。

由于海陆物理属性的差异,造成海陆受热不均,白天陆上增温较海洋快,空气上升,而海洋上空气温度相对较低,使地面有风自海洋吹向大陆,补充大陆地区上升气流,而陆上的上升气流流向海洋上空而下沉,补充海上吹向大陆气流,形成一个完整的热力环流;夜间环流的方向

正好相反，所以风从陆地吹向海洋。将这种白天风从海洋吹向大陆称海风，夜间风从陆地吹向海洋称陆风，所以，将在 1 天中海陆之间的周期性环流总称为海陆风。

海陆风的强度在海岸最大，随着离岸的距离增加而减弱，一般影响距离在 20～50 km 左右。海风的风速比陆风大，在典型的情况下，风速可达 4～7 m/s。而陆风一般仅 2 m/s 左右。海陆风最强烈的地区，发生在温度日变化最大及昼夜海陆温度最大的地区。低纬度日射强，所以海陆风较为明显，尤以夏季为甚。

此外，在大湖附近同样日间有风自湖面吹向陆地称为湖风，夜间自陆地吹向湖面称为陆风，合称湖陆风。

2. 山谷风

山谷风的形成原理跟海陆风是类似的。白天，山坡接受太阳光热较多，空气增温较高；而山谷上空，同高度上的空气因离地较远，增温较低。于是山坡上的暖空气不断上升，并从山坡上空流向谷地上空，谷底的空气则沿山坡向山顶补充，这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向山坡，称为谷风。到了夜间，山坡上的空气受山坡辐射冷却影响，空气降温较多；而谷地上空，同高度的空气因离地面较远，降温较少。于是山坡上的冷空气因密度大，顺山坡流入谷地，谷底的空气因汇合而上升，并从上面向山顶上空流去，形成与白天相反的热力环流。下层风由山坡吹向谷地，称为山风。故将白天风从山谷吹向山坡，这种风叫谷风；到夜间，风自山坡吹向山谷，这种风称山风。山风和谷风又总称为山谷风。

山谷风风速一般较弱，谷风比山风大一些，谷风一般为 2～4 m/s，有时可达 6～7 m/s。谷风通过山隘时，风速加大。山风一般仅 1～2 m/s。但在峡谷中，风力还能增大一些。

二、风能资源的计算及其分布

在了解了地球上风的形成和风带的分布规律之后，将进一步估计某一地区以及更大范围内风能资源的潜力。这是风力利用的基础，也是最紧要和首先要做的工作。因为任何风力利用装置，从设计、制造，到安装使用以及使用效果，都必须考虑风能资源状况。否则工艺制造再好的风力机，也将不可能达到预期的效果。比如，根据某一地区风能特点设计制造出来的风力机，盲目地拿到另一地区来安装，有可能使用的经济效果就很差，或是与原设计的结果相差很远，以至造成大量的经济损失，带来难以弥补的后果。因此在积极提倡和大力推广风能利用的工作中，掌握风能资源的状况是很重要的。

如前所述，地球上风的形成主要由于太阳辐射造成地球各部分受热的不均匀，因此形成了大气环流以及各种局地环流。除了这些有规则的运动形式之外，自然界的大气运动还有复杂而无规则的乱流运动。一般来说，风能在空间分布上是分散的，在时间分布上是不稳定和不连续的，时大时小，时有时无。但是风能在空间和时间分布上仍有非常明显的地域性和时间性。因此，这就对风能资源潜力的估计，风电场的选址提供了可靠的天气气候背景。

(一)风能总储量的估计

风能利用究竟有多大的发展前景，对它的总储量就需要有一个客观的估计。这样在制定今后可以发展的各种能源比例上就可以进行更合理的配置，充分发挥其效益。

1948 年，普特南姆(Putnam)对全球风能储量进行了估算，他认为大气总能量约为 10^{20} W。这个数量得到世界气象组织的认可，并在 1954 年世界气象组织出版的技术报告第 4 期《来自于风的能量》专集中，进一步假定上述数量的一千万分之一是可为人们所利用的，即有 10^{10}

W 为可利用的风力。这就相当于 10 000 个每座发电量 10^6 W 的典型燃料发电厂的发电量。这个数量也就是相当于当今全世界能源的总需求量。可见，它是一个十分巨大的潜在能源库。然而冯阿尔克斯(W. S. von Arx)1974 认为上述估量过大，这个量只是一个贮藏量，对于再生能源来说，必须跟太阳能的流入量对它的补充相平衡，其补充率较它小时，它将会衰竭，因此人们关心的是可利用的风的动能。他认为地球上可以利用的风力为 10^{12} W。即使如此，可利用风力的数量仍旧是地球上可利用的水力的 10 倍。因此在再生能源中，风能是一种非常可观的、有前途的能源。

古斯塔夫逊(1979)从另一个角度推算了风能利用的极限。他根据风能从根本上说是来源于太阳能，可以通过估计到达地球表面的太阳辐射流有多少能够转变为风能，来得知有多少可利用的风力。

根据他的推算，到达地球表面的太阳辐射流是 1.8×10^{17}W，经折算后也就是 350 W/m^2，其中转变为风的转化率 $\eta=0.02$，可以获得的风能为 3.6×10^{15} W，即 7 W/m^2。在整个大气层中边界层中的风能占有 35%，也就是边界层中能获得的风能为 1.3×10^{15} W，即2.5 W/m^2。作为一种稳妥的估计，在近地面层中的风能提取极限是边界层中的 1/10，即 0.25 W/m^2，全球的总量就是 1.3×10^{14} W。古斯塔夫逊根据埃尔萨西尔(Ellsaeseer)所作的全球不同高度上大气动能耗散率的图，认为美国本土相当接近全球耗散率，因此按美国8×10^{12} m^{2}面积计算了美国在边界层范围内风能获得量为2×10^{13} W，而可以被提取利用的量是2×10^{12} W。这个数量是目前美国发电总装机容量 7×10^{11} W 的 3 倍。

我们根据全国年平均风能功率密度分布图，利用每平方米 25 W、50 W、100 W、200 W 等各等值线区间的面积乘以各等级风能功率密度，然后求其各区间积之和，计算出全国 10 m 高度处风能储量为 322.6×10^{10} W，即 32.26×10^{11} W，这个储量称作“理论可开发量”。实际可开发的量，要考虑风力机间的湍流影响，一般取风力机间距 10 倍叶轮直径，因此按上述总量的 1/10 估计，并考虑风力机叶片的实际扫掠面积(对于 1 m 直径叶轮的面积为 $0.5^2\times\pi=0.785$ m^2)，因此，再乘以扫掠面积系数 0.785，即为实际可开发量。

由此，便可得到我国风能实际可开发量为 2.53×10^{11} W。这个值不包括我国海面上的风能资源量。同时，仅是 10 m 高度层上的风能资源量，而非整层大气或整个近地层内的风能量。因此，本估算值与阿尔克斯、古斯塔夫逊等人的估算值不属同一概念，不能直接与之比较。

(二)风能的计算

1. 风能公式

风能的利用主要是将它的动能转化为其他形式的能，因此计算风能的大小也就是计算气流所具有的动能。

在单位时间内流过垂直于风速截面积 S(m^2)的风能，即风功率

$$W=\frac{1}{2}\rho v^3 S, \qquad (2.3.1)$$

式中，W 为风能，单位为 kg · m^2 · s^{-3}，即为 W；ρ 为空气密度，单位 kg/m^3；v 为风速，单位 m/s。公式(2.3.1)是常用的风功率公式。而风力工程上，则又习惯称为风能公式。

由公式(2.3.1)，可以看出：风能大小与气流通过的面积、空气密度和气流速度的立方成正比。因此，在风能计算中，最重要的因素是风速，风速取值准确与否对风能的估计有决定性作用。如风速大 1 倍，风能可大 8 倍。

为了衡量一个地方风能的大小，评价一个地区的风能潜力，风能密度是最方便和有价值的量。风能密度是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能。将(2.3.1)式除以相应的面积S，当$S=1$，便得到风功率密度公式，也称风能密度公式

$$w = 1/2\rho v^3. \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{2.3.2}$$

由于风速是一个随机性很大的量，必须通过一定时间的观测来了解它的平均状况。因此在一段时间长度内的平均风能密度，可以将上式对时间积分后平均。

当已知在T时间长度内风速v的概率分布$P(v)$后，平均风能密度便可计算出来。

风速分布$P(v)$在研究了风速的统计特性后，可以用一定的概率分布形式来拟合，这样就大大简化了计算的手续。

由于风力机需要根据一个确定的风速来设计风力机的额定功率，这个风速称为额定风速。在这种风速下，风力机功率达到最大。风力工程中，把风力机开始运行作功时的这个风速称为起动风速或切入风速。大到某一极限风速时，风力机就有损坏的危险，必须停止运行，这一风速称为停机风速或切出风速。因此，在统计风速资料计算风能潜力时，必须考虑这两种因素。通常将从切入风速到切出风速之间的风力称"有效风力"。这个范围内的风能称为"有效风能"。因此还必须引入"有效风能密度"这一概念，它是有效风力范围内的风能平均密度。

(1)空气密度的计算

从风能公式可以看出，ρ的大小直接关系到风能的多少，特别是在海拔高的地区，影响更突出。所以，计算一个地点的风能密度，需要掌握的量是所计算时间区间内的空气密度风速。在近地层中，空气密度ρ的量级为10^0，而风速(v^3)的量级为$10^2\sim10^3$。因此，在风能计算中，风速具有决定性的意义。另一方面，由于我国地形复杂，空气密度的影响也必须要加以考虑。空气密度ρ是气压、气温和湿度的函数，其计算公式为

$$\rho = \frac{1.276}{1+0.00366t}\left(\frac{p-0.387e}{1000}\right), \tag{2.3.3}$$

式中，p为气压(hPa)，t为气温(℃)，e为水汽压(hPa)。

(2)风的统计特性

由于风的随机性很大，因此在判断一个地方的风况时，必须有足够多和足够长的气象资料。我国幅员辽阔，气候特点复杂，因此各个地区风的统计特性也表现出很大的差异。能够反映风的统计特点的一个最重要的形式是风速的分布曲线。利用气象资料可以得到各种风速出现的频率。在风能利用中，首先要了解的也是最重要的是年风速分布曲线。为了正确地得到年风速分布，首先应该具有风速连续自记记录，并且资料的长度至少有3年以上的观测记录，一般要求能达到5～10年。在实际工作中，有时为了节省工作量，可以从5～10年资料中选取一个接近年平均状态的年份，一个风速最小年份和一个风速最大年份为代表，然后相加平均进行年风速分布统计。

有不少人习惯于用平均风速的概念来衡量一个地方的风能资源状态。这无疑是非常方便的，但这种做法有很大的局限性，因为它必须满足一定的条件，才具有比较性。同时用平均风速一个指标估算风能很难有较高的准确度。因为风速分布是一个偏态的概率分布，众所周知，要描写这样一个分布至少要有3个参数：即平均值、离差系数和偏差系数。因此，仅仅靠一个参数是很难准确地描述风速的分布情形的。平均风速即使相同，其风速概率分布型式$P(v)$并不一定相同，计算出的风能值将有很大的差异。这主要原因就在于影响风速分布的气候原因和地理

原因是各不相同的，例如我国东南沿海夏、秋季多受台风的袭击。而这一时期平常风力较小，但平均的结果可以有较高的平均风速值。而在北方，台风的侵扰机会极少，在同样的平均风速之下，显然可以利用的时间就要多。选择有关站统计的结果见表 2.3.1。

表 2.3.1　各地风速、风能对比表

地名	平均风速	≥3 m/s 小时数	两站差值	两站比值	≥3 m/s 风能 kW	两站差值	两站比值
嵊泗	6.78	7723	783	1.11	3169	203	1.07
泰山	6.68	6940			2966		
青岛	5.28	7115	100	1.01	1568	82	1.06
石浦	5.23	7015			1486		
长春	4.2	5534	354	1.06	1196	345	1.41
满洲里	4.2	5888			851		
西沙	4.79	6634	892	1.16	1137	109	1.11
五道梁	4.79	5742			1082		
茫崖	4.85	6347	15	1.00	1001	501	1.50
施大	4.90	6332			1502		
涠洲岛	3.99	5782	598	1.12	705	172	1.24
锦州	4.0	5184			877		
多伦	3.97	4806	373	1.08	1159	286	1.33
烟台	3.93	5179			873		
丹东	3.03	4006	102	1.03	452	27	1.06
阳江	3.03	4108			425		
林芝	1.85	1967	528	1.27	203	115	1.75
福州	1.85	2495			355		
九江	2.40	3128	95	1.03	203	152	1.75
阜新	2.41	3223			355		
库车	2.07	1862	483	1.26	93	90	1.87
日喀则	2.03	2345			103		
梅县	0.97	500	161	1.32	19	6	1.32
梧州	0.98	661			25		

由表 2.3.1 可以看出，≥3 m/s 风速在 1 年中出现的小时数，在平均风速基本相同的情况下，最大的可相差几百小时，占≥3 m/s出现小时数的 30%，两者相等的几乎没有。其能量相差就更为突出，有的可相差 1.5 倍以上，在所统计的 300 余个站当中，两站平均风速基本相同，而≥3 m/s 小时数和风能也相同者，其数量还不到总站数的 5%。

2. 风能功率密度的计算

关于风速的分布，国外有过不少的研究(Joseph，P. *et al*，1977；Justus，C. G.，1978；L. Van der Auwera *et al*，1980)，近年来国内也有探讨。风速分布一般均为正偏态分布，一般说，风力愈大的地区，分布曲线愈平缓，峰值降低右移。这说明风力大的地区，一般大风速所占比例也多。如前所述，由于地理、气候特点的不同，各种风速所占的比例有所不同。

通常用于拟合风速分布的线型很多，但威布尔(Weibull)分布双参数曲线，普遍认为适用于风速作统计描述的概率密度函数。

威布尔分布是一种单峰的，双参数的分布函数簇。其概率密度函数可表达为

$$P(X) = \frac{k}{c}\left(\frac{x}{c}\right)^{k-1}\exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^{k}\right], \qquad (2.3.4)$$

式中，k 和 c 为威布尔分布的两个参数，k 称作形状参数，c 称作尺度参数。当 $c=1$ 时，称为标准

威布尔分布。形状参数 k 的改变对分布曲线形式有很大影响。当 $0<k<1$ 时，分布的众数为 0，分布密度为 x 的减函数；当 $k=1$ 时，分布呈指数型；$k=2$ 时，便成为瑞利分布；$k=3.5$ 时，威布尔分布实际已很接近于正态分布了。

经国内外广泛研究表明，威布尔分布是一种形式简单且又能较好地拟合实际风速分布的概率模型，被公认为风能分析的有用工具。

由(2.3.4)式可以看到，只要给定了威布尔分布参数 c 和 k 之后，平均风能密度、有效风能密度，风能可利用小时数都可以方便地求得。不仅如此，知道了分布参数 c、k，风速的分布形式便给定了，具体风机设计的各个参数同样可以决定，而毋须逐一查阅和重新统计所有的风速观测资料。这无疑给实际使用带来许多方便。一些研究结果还表明，威布尔分布不仅可用于拟合地面风速分布，也可用于拟合高层风速分布。其参数在近地层中随高度的变化很有规律。当知道了一个高度风速的威布尔分布参数，便不难根据这种规律求出近地层中任意高度风速的威布尔分布参数。由于这些特点，使得用威布尔分布拟合风速频率分布较之用其他分布拟合更为方便。

参数 c 和 k 的估计。估计风速的威布尔分布参数的方法有多种，根据可供使用的风速统计资料的不同情况可以作出不同的选择。

通常可采用的方法有：累积分布函数拟合威布尔曲线方法(即最小二乘法)；平均风速和标准差估计威布尔参数方法；平均风速和最大风速估计威布尔分布参数方法等。

根据国内外大量的验算结果表明，无论以那一种方法，双参数的威布尔分布仍是一种较好地拟合风速实际分布的概率模型。

(三)风能资源分布

风能资源潜力的多少，是风能利用的关键。收集能量的成本是由风力机设备的成本、安装费用和维修费等与实际的产能量所确定的。因此选择一种风力机，不但要着重考虑节省基本投资，而且还要根据当地风能资源选择适当的风力机。使风力机与风能资源二者相匹配，才能获得最大的经济效益。

利用上述方法计算了全国有效风能功率密度和可利用小时数(如图 2.3.5 和 2.3.6)。它们代表了风能资源丰歉的指标值。将这两张图综合归纳分析，可以看出如下几个特点：

1. 大气环流对风能分布的影响

东南沿海及东海、南海诸岛，因受台风的影响，最大年平均风速在 5 m/s 以上。大陈岛台山可达 8 m/s 以上，风能也最大。东南沿海有效风能密度≥200 W/m^2，其等值线平行于海岸线，风速≥3 m/s 全年出现累积小时数为 7 000～8 000 h，(全年为 8 760 h)；风速≥6 m/s 有 4 000 h左右。岛屿上的有效风能密度在 200～500 W/m^2 之间，风能可以集中利用。福建台山、东山、平潭、三沙，台湾的澎湖湾，浙江的南麂山、大陈、嵊泗等岛，有效风能密度都在 500 W/m^2 左右，风速≥3 m/s累积在 8 000 h，换言之，平均每天可以有 21 小时以上的风速≥3 m/s。但在一些大岛，如台湾和海南，又具有独特的风能分布特点。台湾风能南北两端大，中间小。海南西部大于东部。

内蒙古和甘肃北部地区，高空终年在西风带的控制下。冬半年地面在蒙古高原东南缘，冷空气南下，因此，总有 5～6 级以上的风速出现在春、夏和夏、秋之交。气旋活动频繁，当每一气旋过境时，风速也较大。这一地区年平均风速在 4 m/s 以上，宝音图可达6 m/s。有效风能密度为 200～300 W/m^2，风速≥3 m/s 全年累积小时数在 5 000 h 以上，风速≥6 m/s 在2 000 h以

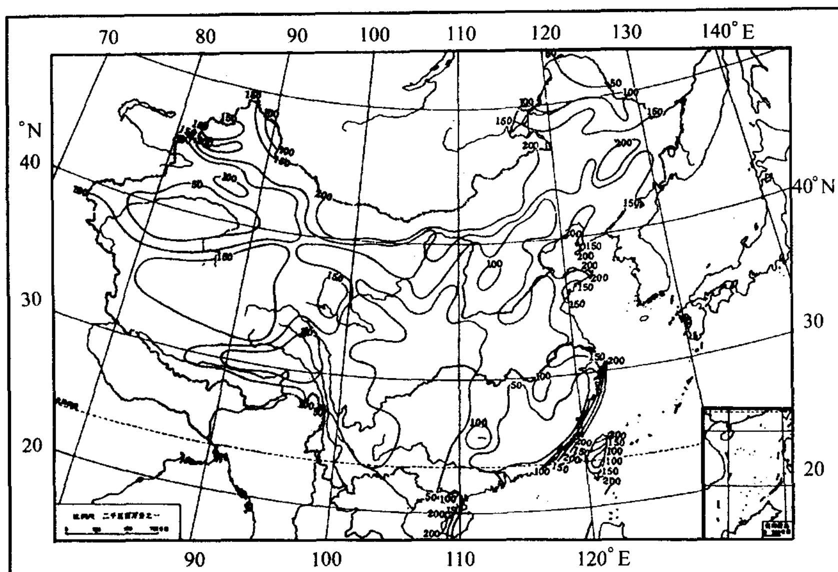


图 2.3.5　中国有效风能密度(w/m²)

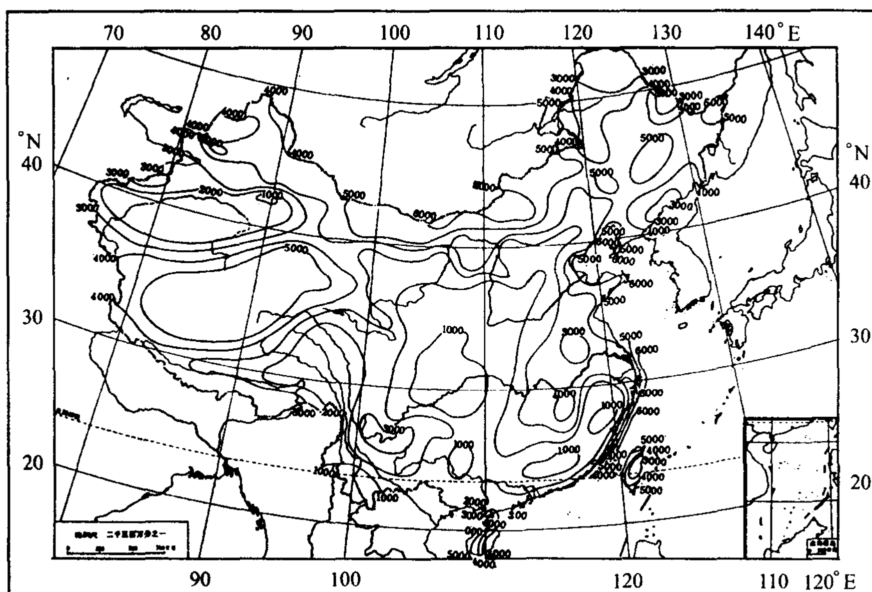


图 2.3.6　中国全年≥3 m/s 风速小时数

上。其规律从北向南递减。其分布范围较大,从面积来看,是我国风能连成一片的最大地带。

云、贵、川、甘南、陕南、豫西、鄂西和湘西风能较小。这一地区因受西藏高原的影响,冬半年高空在西风带的"死水区",冷空气沿东亚大槽南下很少影响这里。夏半年海上来的天气系统也很难到这里,所以风速较弱,年平均风速约在 2.0 m/s 以下。有效风能密度在 50 W/m² 以下。风速≥3 m/s在 2 000 h 以下,风速≥6 m/s 在 150 h 以下。在四川盆地和西双版纳风速最小,

年平均风速小于 1 m/s。这里全年静风频率在 60%以上,如绵阳为 67%,巴中为 60%,阿坝为 67%,恩施为 75%,德格 63%,耿马孟定 72%,景浩 79%,有效风能密度仅30 W/m^2左右。风速 ≥3 m/s 仅 3 000 h 以上,≥6 m/s 仅 20 多小时,换句话说,这里平均每 18 天以上才有 1 次 10 分钟≥6 m/s 的风速。这些地区的风能是没有利用价值的。

2. 海陆和水体对风能分布的影响

我国沿海风能都比内陆大,湖泊风能都比周围湖滨大。这是由于气流流经海面或湖面摩擦力较少,风速较大。由沿海向内陆或由湖面向湖滨,动能很快消耗,风速急剧减小。故有效风能密度、≥3 m/s 和≥6 m/s 风速全年累积小时的等值线不但平行于海岸线和湖岸线,而且数值相差很大。福建海滨是我国风能分布丰富地带,而距海 50 km 处,风能反变为贫乏地带。山东荣城与文登两地相差不到 40 km,荣城有效风能密度为 240 W/m^2,而文登为 141 W/m^2,相差 59%。

3. 地形对风能分布的影响

地形影响风速,可分山脉、海拔高度和中小地形等几个方面。

山脉对风能的影响。气流在运行中遇到地形阻碍的影响,不但会改变大形势下的风速,还会改变风向。其变化的特点与地形形状有密切关系。一般范围较大的地形,对气流有屏障作用,使气流出现爬绕运动。所以在天山、祁连山、秦岭、大小兴安岭、阴山、太行山、南岭和武夷山等的风能密度线和可利用小时数曲线大都平行于这些山脉。特别明显的是东南沿海的几条东北-西南走向的山脉,如武夷山、戴云山、鹫峰山、括苍山等,所谓华夏式山脉,山的迎风面风能是丰富的,风能密度为 200 W/m^2,风速≥3 m/s 出现小时数 7 000~8 000 h。而在山区及其背风面风能密度在 50 W/m^2 以下,风速≥3 m/s 出现小时数 1 000~2 000 h,风能是不能利用的。四川盆地和塔里木盆地由于天山和秦岭山脉的阻挡,为风能不能利用区。雅鲁藏布江河谷,也是由于喜马拉雅山脉和冈底斯山的屏障,风能很小不值得利用。

海拔高度对风能的影响。由于地面摩擦消耗运动气流的能量,在山地风速是随着海拔高度增加而增加的。如表 2.3.2 所示,六对高山与山麓年平均风速对比,其每上升 100 m 风速约增加0.11~0.34 m/s。

表 2.3.2 山顶与山麓的风速对比

站名	海拔高度(m)	高差	年平均风速(m/s)	风速差值	每百米递增率(m/s)
泰山 泰安	1 534 129	1 405	6.2 2.7	3.5	0.25
五台山 原平	2 896 837	2 059	9.0 2.3	6.7	0.33
黄山 屯溪	1 840 147	1 696	5.7 1.2	4.5	0.27
衡山 衡阳	1 266 101	1 165	6.2 2.2	4.0	0.34
庐山 九江	1 164 32	1 132	5.5 2.9	2.6	0.23
华山 渭南	2 065 349	1 716	4.3 2.5	1.8	0.11

事实上在复杂山地，很难分清地形和海拔高度的影响，二者往往交织在一起，如北京与八达岭风力发电试验站同时观测的平均风速分别为 2.8 m/s 和 5.8 m/s，相差 3.0 m/s。后者风大，一是由于它位燕山山脉的一个南北向的低地，二是它的海拔比北京高 500 多米，两者共同作用的结果。

青藏高原海拔在 4 000 m 以上，所以这里的风速比周围大，但其有效风能密度却较小，在 150 W/m^2 左右。这是由于青藏高原海拔高，空气密度较小，影响的风能也小，如在 4 000 m 的空气密度大致为地面的 67%。也就是说，同样是 8 m/s 的风速，在平地海拔 500 m 以下为 313.6 W/m^2，而 4 000 m 只有 209.9 W/m^2。

中小地形的影响。蔽风地形风速减小，狭管地形风速增大。明显的狭管效应如新疆的阿拉山口、达板城、甘肃的安西，云南的下关等，这些地方风速都有明显的增大。

即使在平原上的河谷，如松花江、汾河、黄河和长江等河谷一般风能较周围地区为大。海峡也是一种狭管地形，与盛行风向一致时，风速较大，如台湾海峡中的澎湖列岛，年平均风速为 6.5 m/s，马祖为 5.9 m/s，平潭8.7 m/s ，南澳 8 m/s，又如渤海海峡的长岛，年平均风速为 5.9 m/s 等。

局地风对风能的影响是不可低估的。在一个小山丘前，气流受阻，强迫抬升，所以在山顶流线密集，风速加强。山的背风面，因为流线辐散，风速减小。有时气流过一个障碍，如小山包等，其产生的影响在下风方可达 5～10 km 范围。有些低层风是由于地面粗糙度的变化而形成的。如海陆风是由于不同自然地形空气动力特性有改变，热力性质有改变的结果。山谷风也是不同地形由于辐射条件不同，所以热力状况也有很大差异，导致成为局地环流。

三、风能区划及其利用

划分风能区划的目的，是为了了解各地风能资源的差异，以便合理地开发利用。

(一)区划标准

风能分布具有明显的地域性的规律，这种规律反映了大型天气系统的活动和地形作用的综合影响。

第一级区划选用能反映风能资源多寡的指标，即利用年有效风能密度和年均风速≥3 m/s 的累积小时数的多少将全国分为 4 个区，如表 2.3.3。

表 2.3.3 风能区划的指标

指标 \ 区别	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度(W/m^2)	≥200	200～150	150～50	≤50
年均风速≥3 m/s 小时数	≥5 000	5 000～4 000	4 000～2 000	≤2000
占全国面积(%)	8	18	50	24

第二级区划指标，选用了一年四季中各季风能大小和有效风速出现的小时数。

根据这两种指标，将全国分为 4 个大区，30 个小区。

一般地，仅粗略的了解我国风能区划的大的分布趋势。所以，按一级指标就能满足。

(二)中国风能分区及各区气候特征

按表 2.3.3 的指标将全国划分为 4 个区，如图 2.3.7。

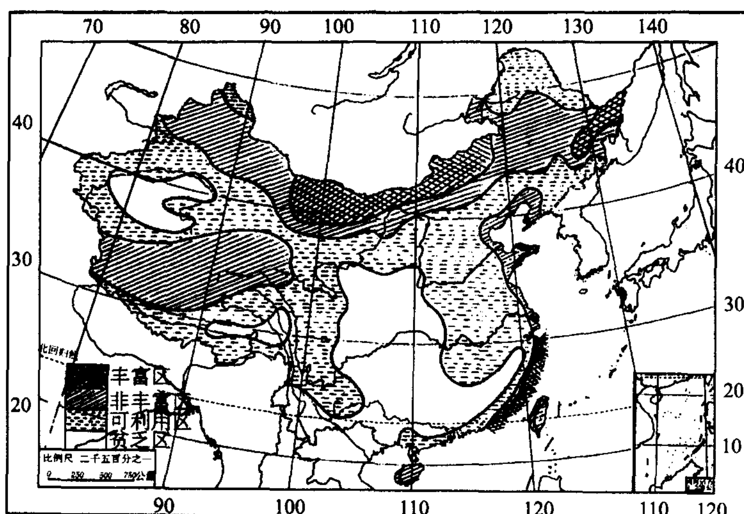


图 2.3.7 中国风能分区图

1. 风能丰富区

从图上可以看出分布在三个地区：

(1)东南沿海、山东半岛和辽东半岛沿海

这一地区由于面临海洋，风力较大。愈向内陆，风速愈小，据研究，在海岸风速为 100%，而在距海岸 50 km 处，风速为海岸风速的 68%。风力等值线与海岸线平行。这一区的风速是全国最大的，但在该区内，东南沿海又是最大的。从表 2.3.4 中可以看出，除了高山站长白山、天池、五台山、贺兰山等外，全国气象站风速≥7 m/s 的地方，都集中在东南沿海。平潭年平均风速为 8.7 m/s，是全国平地上最大的。该区有效风能密度在200 W/m^{2}以上，海岛上可达 300 W/m^{2}以上，其中平潭最大(749.1 W/m^2)。风速 3 m/s 的小时数全年有 6 000 h 以上，风速≥6 m/s 的小时数在 3 500 h 以上。而平潭分别可达 7 939 h 和 6 395 h。也就是说，≥3 m/s 的风速每天平均有 21 h45 min。这里的风能潜力是十分可观的。南澳、台山、大陈、南麂、成山头、东山、马祖、马公、东沙、嵊泗等风能也都很大。(见表 2.3.4)

表 2.3.4 全国年平均风速≥6m/s 的地点

省、区	地点	海拔高度(m)	年均风速(m/s)	省、区	地点	海拔高度(m)	年均风速(m/s)
吉林	天池	2670.0	11.7	福建	九仙山	1650.0	6.9
山西	五台山	2895.8	9.0	福建	平潭	24.7	6.8
福建	平潭海洋站	36.1	8.7	福建	崇武	21.7	6.8
福建	台山	106.6	8.3	山东	朝连岛	44.5	6.4
浙江	大陈岛	204.69	8.1	山东	青岛	39.7	6.2
浙江	南麂岛	220.69	7.8	湖南	南岳	1265.9	6.2
山东	成山头	46.1	7.8	云南	太华山	2358.3	6.2
宁夏	贺兰山	2901.0	7.8	江苏	西连岛	26.9	6.1
福建	东山	51.2	7.3	新疆	阿拉山口	282.0	6.1
台湾	马公	22.0	7.3	山东	泰山	1533.7	6.1
浙江	岱山岛	66.8	7.0	内蒙古	宝音图	1509.4	6.0
山东	砣矶岛	66.4	6.9	辽宁	长海	17.6	6.0

这一区，风能大的原因，主要是由于海面比起伏不平的陆地表面摩擦阻力小。在气压梯度力相同的条件下，海面上风速比陆地要大。

风能季节分配，山东、辽东半岛春季最大，冬季次之，而东南沿海、台湾及南海诸岛都是秋季风能最大，冬季次之。这与秋季台风活动频率有关。

(2)内蒙古北部区

本区是内陆风能资源最好的区域，年平均风能密度在200 W/m^{2}以上，个别地区可达 300 W/m^2。风速≥3 m/s 的时间一年有5 000～6 000 h，虎勒盖尔可达 7 659 h。风速≥6 m/s 的时间一年在 3 000 h 以上，个别地点在 4 000 h 以上(如朱日和为 4 181 h)。

本区地面受蒙古高压控制，每次冷空气南下都可造成较强风力，而且地面平坦，风速梯度较小，春季风能最大，冬季次之。本区不但风能密度大，利用小时数较高，而且地域远较沿海为广。

(3)松花江下游区

本区风能密度在 200 W/m^2 以上，风速≥3 m/s 的时间有5 000 h，每年风速≥6～20 m/s 的时间在 3 000 h 以上。

本区的大风多数是由东北低压造成的。东北低压春季最易发展，秋季次之，所以春季风力最大，秋季次之。同时，这一地区又处于峡谷中，北为小兴安岭，南有长白山，这一区正好在喇叭口处，风速加大。

2. 风能较丰富区

本区在全国分布也集中在三个地区。

(1)东南沿海沿岸和渤海沿海区

从汕头沿海岸向北，沿东南沿海经江苏、山东、辽宁沿海到辽东北丹东。实际上是丰富区向内陆的扩展。这一区的风能密度为 150～200 W/m^2，风速≥3 m/s 的时间有 4 000～5 000 h，≥6 m/s 的有 2 000～3 500 h。长江口以南，大致秋季风能大，冬季次之；长江口以北，大致春季风能大，冬季次之。

(2)三北的北部区

从东北图们江口区向西沿燕山北麓经河套穿河西走廊过天山到新疆阿拉山口南，横穿我国三北中北部。这一区的风能密度为 150～200 W/m^2，风速≥3 m/s 的时间有 4 000～4 500 h。这一区的东部也是丰富区向南向东扩展的地区。在西部北疆是冷空气的通道，风速较大也形成了风能较丰富区。

(3)青藏高原区

本区的风能密度在 150 W/m^2 以上，个别地区(如五道梁)可达 180 W/m^2。而 3～20 m/s 的风速出现时间却比较多，一般在5 000 h以上(如茫崖为 6 500 h)。所以，若不考虑风能密度，仅以风速≥3 m/s 出现时间来进行区划，那么该地区应为风能丰富区。但是，由于这里海拔在 3 000～5 000 m 以上，空气密度较小。在风速相同的情况下，这里风能较海拔低的地区为小，若风速同样是 8 m/s，上海的风能密度为 313.3 W/m^2，而呼和浩特为286.0 W/m^2，二地高度相差 1 000 m，风能密度则相差 10%。林芝与上海高度相差约 3 000 m，风能密度相差 30%；那曲与上海高度相差 4 500 m，风能密度则相差 40%(表 2.3.5)。由此可见，计算青藏高原(包括内陆的高山)的风能时，必须考虑空气密度的影响，否则计算值将会大大地偏高。

表 2.3.5 不同海拔高度风能的差异

风能密度(W/m²) 海拔高度(m) 风速(m/s)	4.5(上海)	1063.0(呼和浩特)	11984.9(阿合奇)	3000(林芝)	4507.0(那曲)
3	16.5	15.1	13.5	11.8	11.0
5	76.5	69.8	62.4	54.4	46.4
8	313.3	286.0	255.5	223.0	190.0
10	612.0	558.6	499.1	435.5	371.1

青藏高原海拔较高,离高空西风带较近,春季随着地面增热,对流加强,上下冷热空气交换,使西风急流动量下传,风力变大,故这一区的春季风能最大,夏季次之。这是由于此区里夏季转为东风急流控制,西南季风爆发,雨季来临,但由于热力作用强大,对流活动频繁且旺盛,所以风力也较大。

3. 风能可利用区

本区大致亦集中在 3 个地区。

(1)两广沿海区

这一区在南岭以南,包括福建海岸向内陆延伸 50～100 km 的地带。风能密度为 50～100 W/m²,每年风速≥3 m/s 的时间为2 000～4 000 h,基本上从东向西逐渐减小。本区虽是我国大陆的南端,但冬季仍有强大冷空气南下,其冷锋可越过本区到达南海,使本区风力增大。所以,本区的冬季风力最大;秋季受台风的影响,风力次大。

由广东沿海的阳江以西沿海,包括雷州半岛,春季风能最大。这可能是由于冷空气在春季被南岭山地阻挡,一股股冷空气沿漓江河谷南下,使这一地区的春季风力变大。秋季,台风对这里虽有影响,但台风西行路径仅占所有台风的 19%,台风影响不如冬季冷空气影响的次数多,故本区的冬季风能较秋季为大。

(2)大小兴安岭山地区

大小兴安岭山地的风能密度在 100 W/m² 左右,每年风速≥3 m/s时间为 3 000～4 000 h。冷空气只有偏北时才能影响到这里,本区的风力主要受东北低压影响较大,故春、秋季风能大。

(3)从东北长白山开始向西过华北平原,经西北到我国最西端,贯穿我国东西的广大地区

由于本区有风能欠缺区(即以四川为中心)在中间隔开,这一区的形状与希腊字母"π"很相像,它约占全国面积 50%。在"π"字形的前一半,包括西北各省、区的一部分、川西和青藏高原的东部与南部。风能密度为 100～150 W/m²,一年风速≥3 m/s 的时间有4 000 h左右。这一区春季风能最大,夏季次之。但雅鲁藏布江两侧(包括横断山脉河谷)的风能春季最大,冬季次大。"π"字形的后一半分布在黄河和长江中下游。这一地区风力主要是冷空气南下造成的,每当冷空气过境,风速明显加大,所以这一地区的春、冬季节风能大。由于冷空气南移的过程中,地面气温较高,冷空气很快变性分裂,很少有明显的冷空气到达长江以南。但这时台风活跃,所以这里秋季风能相对较大,春季次之。

4. 风能欠缺区

从全国风能分区图上看本区同其他各区一样集中三个地区。但这三个区共同的特点是四

面都有高山环绕。

(1)川云贵和南岭山地区

本区以四川为中心，西为青藏高原，北为秦岭，南为大娄山，东面为巫山和武陵山等。这一地区冬半年处于高空西风带“死水区”内，四周的高山，使冷空气很难入侵。夏半年台风也很难影响到这里，所以，这一地区为全国最小风能区，风能密度在 50 W/m² 以下。成都仅为 35 W/m²左右。风速≥3 m/s 的时间在 2 000 h 以下，成都仅有 400 h，恩施、景洪二地更小。南岭山地风能欠缺，由于春、秋季冷空气南下，受到南岭阻挡，往往停留在这里，冬季若冷空气到此也形成南岭准静止锋，故风力较小。南岭北侧受冷空气影响相对比较明显，所以冬、春季风力最大。南岭南侧多受台风影响，故风力最大的在冬、秋两季。

(2)雅鲁藏布江和昌都区

雅鲁藏布江河谷两侧为高山。昌都地区，也在横断山脉河谷中。这两地区由于山脉屏障，冷、暖空气都很难侵入，所以风力很小。有效风能密度在 50 W/m² 以下，风速≥3 m/s 时间在 2 000 h以下。但雅鲁藏布江风能是春季最大，冬季次之，而昌都是春季最大，夏季次之。

(3)塔里木盆地西部区

本区四面亦为高山环抱，冷空气偶尔越过天山，但为数不多，所以风力较小。塔里木盆地东部由于是一马蹄形“C”的开口，冷空气可以从东灌入，风力较大，所以盆地东部属可利用区。

(三)各风能区中，不同下垫面风速的变化

上面已谈到，四个风能区是粗略的区分。往往在一些情况下，丰富区中可能包括较丰富的地区，较丰富区又包括丰富的地区。这种差异，一般是由于下垫面造成的，特别是山脊、山顶和海岸带地区。

根据大量实测资料对比分析，参照国外的资料给出表 2.3.6。

表 2.3.6 10 m 高 4 类不同地形条件下风能功率密度和年平均风速对比

风速/风能 \ 不同地形 风能区	城郊气象站(遮蔽)		开阔平原		海岸带		山脊和山顶	
	风速 (m/s)	风能 (W/m²)	风速 (m/s)	风能 (W/m²)	风速 (m/s)	风能 (W/m²)	风速 (m/s)	风能 (W/m²)
丰富区	>4.5	>225	>6.0	>330	>6.5	>372	>7.0	>425
较丰富区	3.0—4.5	155～255	4.5～6.0	225～330	5.0～6.5	262～372	5.5～7.0	296～425
可利用区	2.0—3.0	95～115	3.0～4.5	123～225	3.5～5.0	155～262	4.0～5.5	193～296
贫乏区	<2.0	<95	<3.0	<123	<3.5	<155	<4.0	<193

由表可知，气象站观测的风速较小，这主要是由于气象站一般位置在城市附近，受城市建筑等的影响使风速偏小。如在丰富区，气象站年平均风速在 4.5 m/s，开阔的平原为 6 m/s，海岸带为6.5 m/s，到山顶可达 7.0 m/s。这就说明地形对风速的影响是很大的。若以风能而论影响更为明显，同是丰富区气象站风能功率密度为 225 W/m²，而山顶可达 425 W/m²，几乎增加 1 倍。所以，风电场就存在一个选址的问题，也是非常关键的问题。

(四)风能开发利用

风能的开发利用可以分为两大类。一类是并网型的，一类为离网型的。

1. 并网型的开发利用

大型风力发电机都是直接并入电网运行。所以,必须风力机集中安装在一个地方,形成规模,将此称为风电场(Wind fied)或称为风力农场(Wind farm)也有叫风力田的。但实际应用中,英文90%以上用Wind farm,中文95%以上用风电场。其意义完全相同。

Wind farm是美国1987年提出的,是指众多的风力机安装在旷野上,有几十台、几百台甚至上千台,并网运行的中大型风力发电机,由计算机控制,统一管理向电网输送强大的电力。由此可见,风电场是应用现代科学技术,对风能资源进行大规模开发利用的一个创举。风电场的崛起标志着风力发电跃入了具有实际意义和商品价值的新阶段。

我国现有风电场43个,较大的有新疆的达坂城,甘肃的玉门,内蒙古的朱日和、商都、锡林浩特、赤峰、辉腾锡勒,河北的张北,黑龙江的富锦,吉林的通榆,辽宁的东岗、仙人岛、丹东、横山,山东的长岛,浙江的鹤顶山、括苍山,福建的平谭、广东的南澳、汕尾、惠来,海南的东方,宁夏的贺兰山等风电场。安装大型风力机(1500～600 kW级)几十台到百台以上。而且辉腾锡勒和达坂城计划还要安装百台或更多的风力机。我国到2004年底,全国风电装机总容量达763770 kW。风力发电场为中国的商品电量提供了洁净能源的电力。

1995年初,国家计委、经贸委、科委联合发表《中国新能源和可再生能源发展纲要(1995～2010)》,"乘风计划"、"双加工程"更有力地推动我国风电场建设的高速发展。

我国1996年施行的《中华人民共和国电力法》也明确规定:"国家鼓励和支持利用可再生能源和清洁能源发电"。这些都是为开发利用新能源和再生能源,包括风能在内提供了政策保障。我国计划到2005年装机容量为100万kW,2010年为400万kW,2015年为1000万kW,2020年为2000万kW。

2. 离网型的开发利用

顾名思义,离开电网独立运行。这种风机一般较小,但用途也很广。

(1)小型和微型风力发电

在我国广大边远地区,那里电网尚不能达到,我国还有7 656万人口没有用上电。还有828个无电乡和29 783个无电村,这些地区都远离电网,负荷小而分散,近20年也不可能都通过延伸电网向这些地区供电。在"六五"和"七五"期间,我国成功地研制开发了多种小型和微型风力发电机,特别是"七五"期间,内蒙古、新疆、青海等省、自治区对风电实行政策性扶持(如内蒙古实行的定额补贴),大大促进了小、微型风力发电机的发展,如50～200 W的户用微型风力发电机安装了12万余台,解决了约50万农牧民的照明、看电视等基本生活用电问题,取得了很好的效果。尤其是边疆地区,电灯、电视进入家庭,提高了农牧民的生活水平,农牧民用上电,称之为获得了"第二次解放",极大地增强了他们的爱国热情。

风/光/柴互补独立供电系统是目前国际上公认的最合理的独立供电系统,特别适合于解决以乡、村为单位的无电地区的供电问题。

(2)风力提水

我国适合风力提水的地区很广。目前已研制的风力提水机组可分两大类:一类是低扬程(0.5～3 m)大流量(50～100 t/h)型,用于沿海抽提地表水,也有人称"南方型";另一类为高扬程(10～100 m)小流量(0.5～5 t/h)型,用于内陆抽提地下水,也有人称此为"北方型"。主要用于人畜饮水,海水制盐、水产养殖、提水灌溉和提水排泄等。

风力提水在我国不仅有明显的经济效益,还有较好的社会效益和环境效益。

(3)风帆助航

风帆船是人类利用风能的开端。日本1980年制造成世界第一艘现代商用风帆船“新爱德丸”号下水。美国1981年也采用风帆助航,改装了一艘66 m长的货轮。还有一些国家都在研究现代化风帆船。

我国自1982年开始,一些科研生产单位开展了风帆助航的研究,1985年武汉水运工程学院完成了60 t、120 t、200 t风帆船,已投入运营,全年平均节油10%~15%。

(4)风能采暖

风力致热是将风轮输出的机械能直接转成热能,它具有转换效率高,机组匹配性能好等优点,可用于温室供热,水产养殖和作物干燥等。实现风热直接转换的致热器有摩擦式、搅拌式、挤压式和涡流式等四种。

四、风电场选址

风能是风速的3次方,风速相差1倍,风能相差8倍,所以,选择一个好的风电场风速是至关重要的。风电场场址选择的好坏,对风能利用的预期目的能否达到,有着关键的作用。当然,风电场还要考虑电网、交通、环境、生活等条件,但风能资源是重中之重。

由于风能受天气、气候、地形和海陆等影响很大。但风能在空间和时间分布上有非常明显的地域性和时间性。所以选择品位较高的风电场是有规律可循的。国际上规定年平均风速6、7、8 m/s,分别为一般、较佳、最佳风电场。也就是说风电场最低风速为年平均风速在6 m/s以上,我国2 000多个台站,年平均风速在6 m/s以上仅几十个,除高山站外,所剩无几,选址问题仍是很突出的。

选址除了利用现有气象台站的资料外,还要根据当地地形、海陆分布等,按流体力学、小区域气候模式,研究大气流动规律,结合现场实地观测资料,最后判断能否建立风电场。

(一)选址的技术原则

1. 风能资源丰富区

我国规定年平均风速必须≥6 m/s以上才能建立风电场。若海拔较高,还必须订正到标准状态下的6 m/s风速。如内蒙古一风电场海拔2 200 m以上,实测风速7.2 m/s,但空气密度为1.07 kg/m^3,标准空气密度为1.225 kg/m^3,两者比值0.873,也就是说7.2 m/s的风速订正到标准状态下为6.2 m/s。

在风能分区中的丰富区或者靠近丰富区的较丰富区,还要进一步作风能资源详查,对于短期现场的风速观测资料,还应序列订正到长年代风速资料,因为在观测的那一年,可能是大风年或小风年,若不订正,有产生风能估计偏大或小的可能性。订正方法以经验正交函数展开为基础的多元回归方法。

风力资源的优劣,直接影响风力发电量,从而影响其发电成本。在相同的条件下年平均风速7 m/s的风电场发电成本比6.5 m/s的下降8%左右,7.5 m/s的下降14%左右,8 m/s的下降近30%;而年平均风速6 m/s的风电场的发电成本比6.5 m/s的上涨11%左右,因此,认真选择一个好的风电场是非常重要的。它直接关系到风电场的投资效益。

2. 稳定的盛行风向

对于风力机而言,除了风资源条件较好外,总希望有比较稳定的风向。我国地面气象观测规范规定的风向观测是按16个方位表示的。在气象报表上都记有“各风向频率”,可以将各风

向频率绘制成风玫瑰图。所谓盛行风向就是指出现频率最多的风向。有了稳定支配风向，使得在选址时，比较容易地考虑地形有利或不利的影响。

盛行风向也是风力机合理排列的主要依据。

3. 容量系数较大地区

风力机容量系数是指一个地点风力机实际能够得到的平均输出功率与风力机额定功率之比。容量系数愈大，风力机实际输出功率愈大。风电场选址在容量系数大于30%的地区有较显著的经济效益。

4. 风速的日变化和季节变化要小

由于风能利用中需要考虑到风速的稳定性，因此在选址时尽量要求不要有过大的风速日变化和季节变化。

从全国来着，低层风速的日变化可以分为两种主要类型：一种是大陆型：表现为白天风力变大，夜间变小。这是由于白天地表温度上升快，地面温度高于气温，空气变得不稳定，上下对流的结果，上层动量下传造成低层风速变大。另一种是海上型：表现为下半夜到中午之前风速较大，而午后到上半夜风速较小。原因在于上午海温高气温低，而下午情况则相反。海上与陆地相比，一般说来海上风力的日变化比陆地要小，上述规律也是指在没有大风的天气过程时才比较明显。具体一个地方风速日变化和季节变化情况，还是以当地气象观测记录为准。

5. 风机高度范围内风的垂直切变要小

引起风的垂直切变有热力的也有动力的原因。对于风机选址所要考虑的主要是因下垫面粗糙度而引起的不同垂直剖面风速廓线。特别是两种截然不同下垫面上空存在垂直 切变相当大的风速剖面。这种切变对风机的工作是极为不利的。

6. 湍流强度要小

由于无规则的湍流给风力机带来难以预计的危害，它一方面减小可利用的风能，另一方面使风力机产生振动和受载不均匀，缩短风力机寿命，严重时使叶片发生不应有的毁坏。因此在选址时要尽量使风力机避开粗糙的地表面或障碍物。可能的情况下，风力机的叶轮要比附近的障碍物高出6～7 m，离开障碍物的距离应是障碍物高度5～10倍远。

7. 尽量避开灾害性天气频繁地带

灾害性天气包括强风暴(如强台风、飑线、龙卷风等)、雷电、电线积冰、沙尘暴、大雪、盐雾等等．但有时在选址时不可避免要将风机安装在上述地区，这时在设计与使用时必须考虑对风机的防护。

(二)风电场现场位置选择对策

知道了风能资源和风况勘测结果后，便可根据风电场选址的技术原则，粗略地定点，然后分析地形特点，充分利用有利于加大风速的地形，再来确定风力机的安装位置。

世界气象组织(WMO)出版的风能资源利用方面的气象问题中，给出了确定风力机安装地址的对策框图，如图2.3.8。

由图可见，首先确定盛行风向，其次按地形分类，分为平坦地形和复杂地形。平坦地形主要考虑地面粗糙度和障碍物的影响；复杂地形除此外，还要考虑地形特征的影响。

1. 地面粗糙度对风速影响

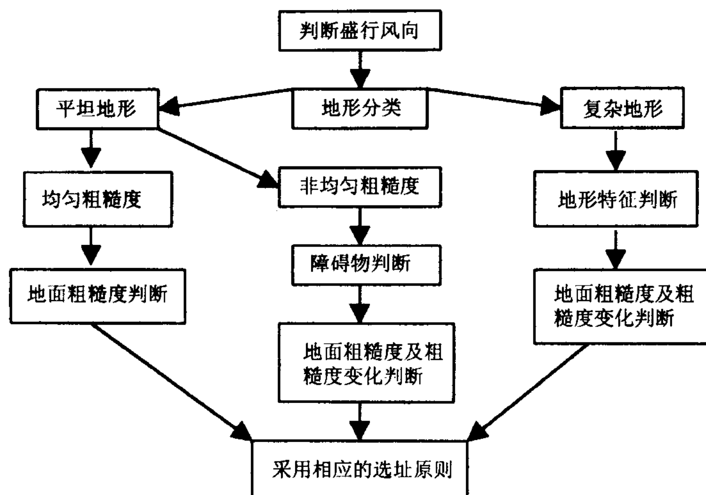


图 2.3.8　根据地形特点确定风机位置对策

风速是测量时离地面高度的函数，边界层内风速随高度变化的关系，取决于地面粗糙度。现在一般都承认，风速随高度变化的关系是遵循指数律廓线。

由于地面粗糙度各个地方不相同，其地面可分为 3 或 4 种类型，各用不同的幂指数。如海面、海上小岛、海岸及大沙漠为一种类型，空旷田野、乡村、丛林等为一类型，森林、城市建筑群等为一类型等。

精确的地面粗糙度，必须通过梯度观测而求得。通常往往得不到梯度观测值，所以，需要找出指数和周围环境的关系。因为指数依赖地面粗糙度。波里申科和查法林给出了指数与地面粗糙度的关系。

指数随粗糙度增加而增加，这就造成风速切变在接近地面时减小。

因为指数还随着风速的增大而减小，所以，一般取平均风速状态下的指数。由于风能的大小与风速立方成正比，因此，只要适当的提高风力机塔架的高度，风速增大，就可使风能捕获力大大提高，多发电。

2. 障碍物的影响

由于气流流过障碍物，在它的下游会形成尾流扰动区。在尾流中不仅风速降低，而且有很强的湍流，对风机的运行十分不利。因此在风机设置时必须注意避开障碍物的尾流区。尾流的大小与强弱跟障碍物大小与体型有关。

一般来说，在障碍物下风方向 10～20 倍障碍物高度的地区是强的扰动尾流区，风机设置尽力避开这个范围。同时，在垂直方向上尾流扰动区还可以达到障碍物高度的 2 倍。因此如果必须在这个区域内安装风机时，其安装高度至少高出地面以上的 2 倍障碍高度。由于障碍物的阻挡作用，在上风向以及障碍物的外侧也会造成湍流涡动区。一般说来，风机安装地点如果在障碍物上风方向，也应距障碍物有 2～5 倍障碍物高度的距离。

不同形状建筑物尾流中风速、风能及湍流的变化，见表2.3.7。

表 2.3.7 不同形状建筑物尾流中风速的变化

建筑物形状（宽高比）	下游距离 5H 风速降低（%）	5H 风能减少（%）	5H 湍流增强（%）	10H 风速降低（%）	10H 风能减少（%）	10H 湍流增强（%）	20H 风速降低（%）	20H 风能减少（%）	20H 湍流增强（%）
4	36	74	25	14	36	7	5	14	1
3	24	56	15	11	29	5	4	12	0.5
1	11	29	4	5	14	1	2	6	—
0.33	2.5	7.3	2.5	1.3	4	0.75	—	—	—
0.25	2	6	2.5	1	3	0.50	—	—	—
尾流区高度		1.5H			2.0H			3.0H	

注：H 为障碍物高度。

3. 地形的影响

复杂地形是指平坦地形以外的各种地形，大致可以分为隆升地形和低凹地形两类。局地地形对风力有很大影响。这种影响在总的风能资源分区图上显示不出来，需要在大的背景上作进一步的分析和补充测量。然而，复杂地形下的风场特征的分析是相当困难的。但了解了典型地形下的风场分布规律就有可能进一步分析复杂地形下的风场分布。

在河谷内，当风向与河谷走向一致时，风速将比平地大；反之，当风向与河谷走向近于垂直时，气流受到地形的阻碍，河谷内的风速就大为减弱。我国几个有名的大风区，如新疆的阿拉山口、甘肃的安西、云南的下关就是因地形的峡谷效应，使风速得到很大的增强。

山谷地形下，由于山谷风的影响，这里的风将会出现较明显的日或季节变化。因此选址时需考虑到用户的需求。一般地说，在谷地选择风电场，首先要考虑的山谷风走向是否与当地盛行风向相一致。这种盛行风向是指大地形下的盛行风向，而不能按山谷本身局地地形的风向确定。因为山地气流的运动，在受山脉阻挡情况下，会被迫改变流向和流速，在山谷内风多数是沿着山谷吹的。然后考虑选择山谷中的收缩部分，这里容易产生狭管效应。而且两侧的山愈高，风也愈强。不过另一方面，由于地形变化剧烈，所以会产生强的风切变和湍流，在选址时应该注意。

对于山丘、山脊等隆起地形主要利用它的高度抬升和它对气流的压缩作用来选择风机安装的有利地形。

孤立的山丘或山峰由于山体较小，因此气流流过山丘时主要形式是绕流运动。同时山丘本身又相当于一个巨大的塔架，是比较理想的风机安装场址。根据国内外研究和观测结果表明，在山丘与盛行风向相切的两侧上半部是最佳场址位置。这里气流得到最大的加速。其次是山丘的顶部。应避免在整个背风面及山麓选定场址，因为这些区域不但风速明显降低，而且有强的湍流。

高山风速加大还受海拔高度的影响。所以山顶与山麓风速相差很大，如泰山（1 534 m）风速为 6.1 m/s，比泰安（129 m）风速2.8 m/s，相差 2.2 倍；五台山（2 896 m）9.0 m/s，比山麓原平（837 m）的 2.3 m/s，相差 3.9 倍；庐山（1 164 m）5.5 m/s，比九江（32 m）2.7 m/s相差 2 倍。

对于水平延伸距离较长的山脊，要考虑山脊的走向。盛行风与山脊脊线正交，气流在脊峰

加速最大，是理想的山脊朝向；其次是盛行风向与山脊走向斜交；当山脊走向与盛行风向平行时，风速很少增加。除考虑山脊走向外，同时也要考虑山脊的高度，综合两者作用的大小确定风机最佳的安装地点。

根据我国浙江一个山区风速分布特点实地观测的结果表明，大的山体各坡面上的风速都小于同高度自由大气中的风速。且迎风坡和背风坡风速小，侧风坡风速大。最大风速区分布在山体的上部侧风坡和隘口处，其次才是山峰。

此外，在选址时还应注意到，在山脉的背风面，常常产生持续很远的背风波和水平旋涡。风力机应该尽量避开这个区域。

4. 海陆与风速关系

由于海面摩擦阻力比陆地要小，在气压梯度力相同的条件下，低层大气中海面上的风速比陆地上要大。因此各国选择大型风机位置有两种倾向，一是选在山脊上，一是选在近海。近海建立风电场一是风能大，二是不占农田。

在陆上，风速随着离海岸距离的增加而迅速地减小。在我国风能资源分布图上，海岸线附近，是风能密度的水平梯度最大的区域。在近海海面上，风速随着距海岸的距离增加而变大。

以海岸风速作为标准，陆上风速与它的比值跟离海岸的距离建立如下的模式：

向岸风
$$y=\left[\frac{1.93}{x+4.795}\right]^{0.656}+0.45,$$

离岸风
$$y=\left[\frac{8.018}{x+14.071}\right]^{0.766}+0.35,$$

式中，y 为所在地与海岸风速比，x 为离海岸距离(km)。还要注意到，随着风速的增大，海陆间风速差也越小。这是由于大风时，强烈交换使大气的各种性质均匀化，高空动量下传，这时下垫面的摩擦作用较之交换作用为小，因此比值也小。

综合以上所分析的内容，在总的风能资源区划背景下，还要进一步针对具体的地形特点分析来确定风能系统的最佳位置选择。

第四节　中国太阳能、风能综合利用区划

太阳能和风能在利用时都受到气候、季节和地理等多种因素的影响。我国属季风气候区，一般冬半年干燥、风大，太阳辐射强度小；夏半年湿润、风小，太阳辐射强度大。两者变化趋势基本相反，可相互补充利用。为了适应太阳能、风能的变化规律，有人研究了太阳能-风能联合装置。如：丹麦 N. E. Busch 和 K. Møllenbach 提出了太阳能和风能综合利用系统，美国能源部正在研究太阳能-风能混合系统，西德尤尔格 · 施来提出了太阳能-风力试验设想，澳大利亚已研制成太阳能与风能联合发电装置。1982 年 8 月中国空气动力研究会和中国太阳能学会风能专业委员会在北京召开了新概念型发电装置(即太阳能-风能综合发电装置)讨论会。

针对各地太阳能和风能资源的特点，在综合分析基础上，讨论相应的互补利用方式，以尽可能有效地利用这两种能源。

一、区划的指标

太阳能-风能综合利用，首先应了解当地的实际潜力和一年中的时间分配，再对这两种能

源相互补充情况进行分析。

有效的太阳能和风能是互补的两个变量，可以计算出两者变化的时间尺度差，如小时、日或季得到的能量。

我们将太阳能作为一级区划标准，太阳辐射总量大于 1 700 kW·h/(m²·a)为太阳能丰富区，以"Ⅰ"表示；1 500～1 700 kW·h/(m²·a)为较丰富区，以"Ⅱ"表示；1 200～1 500 kW·h/(m²·a)为可利用区，以"Ⅲ"表示；小于 1 200 kW·h/(m²·a)为欠缺区，以"Ⅳ"表示。共分为 4 个区。风能作为二级区划标准，有效风能密度大于 200 W/m² 和风速 3～20 m/s 的年累积小时数在 5 000 h 以上者为风能丰富区，以"A"表示；200～150 W/m² 和风速 3～20 m/s 的年累积小时数 5 000～3 000 h 为风能较丰富区，以"B"表示；150～50 W/m² 和风速 3～20 m/s 的年累积小时数 3 000～2 000 h 为可利用区，以"C"表示；50 W/m² 和风速 3～20 m/s 的年累积小时数 2 000 h 以下为欠缺区，以"D"表示。也分为 4 个区。

利用太阳能年总辐射分布图和风能密度及风速 3～20 m/s 年累积小时数分布图，按上述的一、二级区划标准各自划出 4 个区域，再将这两种能源分布投影到 1 张图上，区分两者重合的与不重合的区域，便可得出各种不同的组合区。如"ⅠA"区，为太阳能、风能均丰富区，"ⅣC"区为太阳能欠缺、风有可利用区等，余此类推。

各个区域能量的季节变化作为三级区划标准，以太阳能和风能的各自月变化曲线，按其两者是同位相还是反位相进行分类。根据我国 400 余个台站的资料，大致可以分为 5 个不同类型，即

(1)太阳能和风能冬、夏的位相相反，也就是夏季太阳能大，风能小，冬季太阳能小而风能大，以"a"表示。

(2)太阳能和风能冬、春季的变化是同位相的，即二者最大值都在春末；夏季变化是反位相的，太阳能较大而风能最小，以"b"表示。

(3)太阳能和风能的最大值都出现在 7～9 月，位相相同。春季太阳能较大而风能较小，是反位相的，以"c"表示。

(4)太阳能只有一个最大值，在夏季；风能有两较大值，在春末和夏末。太阳能和风能在春季是反位相的，以"d"表示。

(5)太阳能和风能同位相，即太阳能和风能的季节变化趋势基本一致，春季太阳能、风能最大，冬季最小，以"e"表示。

根据上述的一、二、三级区划的原则，考虑到我国大气环流、天气气候和地形的特征。将全国划分 13 个大区，31 个类型区，图中下标的数字为地区，如图 2.4.1。

图 2.4.1 中各区主要特征和地区分布如表 2.4.1。

二、各区特征及其评价

(1) 太阳能风能均丰富区，分布在内蒙古中西部($\mathrm{I\,A_{01a}}$)，是我国唯一连成一片的太阳能和风能都丰富的地区。这里年降水量少，太阳辐射值取决于太阳高度角，月总辐射量最小值出现在太阳高度角最低的 12 月，最大值出现在 6～7 月。10 月以后，每当冷空气过境，有 5～6 级以上的大风，所以冬半年风大。夏半年，地面为热低压占据，水平气压梯度小，风力不大，两种能源出现的最大和最小值的时间是相反的，正好补充了两者各自不足，是综合利用太阳能-风能最优越的地区，大有潜力。

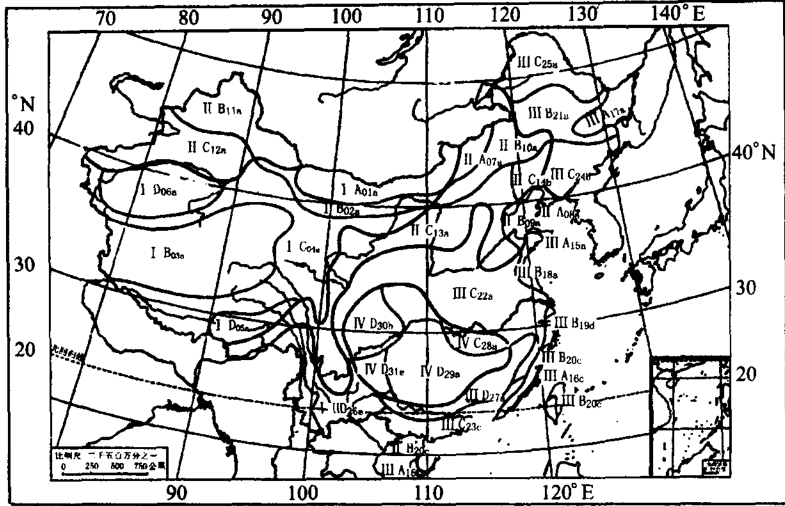


图 2.4.1　中国太阳能和风能综合利用区划

表 2.4.1　各区特征及分布地区

序号	第一级	第二级	第三级	代号	分布地区
1	太阳能丰富	风能丰富	太阳能夏季大，冬季小；风能冬、春季大，夏季小	Ⅰ A_{01a}	内蒙古中西部
2	太阳能丰富	风能较丰富	同上	Ⅰ B_{02a}	内蒙古西部的南端，河西走廊和新疆一部分
			同上	Ⅰ B_{03a}	青藏高原北部
3	太阳能丰富	风能可利用	同上	Ⅰ C_{04a}	塔里木盆地南部、青藏高原的东和南部、甘肃和宁夏一部分
4	太阳能丰富	风能欠缺	同上	Ⅰ D_{05a}	雅鲁藏布江河谷
			同上	Ⅰ D_{06a}	塔里木盆地
5	太阳能较丰富	风能丰富	同上	Ⅱ A_{07a}	内蒙古的锡盟
			同上	Ⅱ A_{08a}	辽东半岛沿海
6	太阳能较丰富	风能较丰富	同上	Ⅱ B_{09a}	渤海沿岸
			同上	Ⅱ B_{10a}	内蒙古的哲盟和昭盟
			同上	Ⅱ B_{11a}	准噶尔盆地
			同上	Ⅱ C_{12a}	天山和塔里木盆地北缘
			同上	Ⅱ C_{13a}	华北大部、陕北、甘南和青藏高原东侧
7	太阳能较丰富	风能可利用	太阳能风能春季最大；夏季风能最小，太阳能较大	Ⅱ C_{14b}	辽东和河北交界地区
			太阳能夏季大，冬季小；风能冬、春季大，夏季小	Ⅲ A_{15a}	山东半岛沿海

（续表）

序号	第一级	第二级	第三级	代号	分布地区
8	太阳能可利用	风能丰富	太阳能、风能夏末秋初最大	ⅡA_{16c}	东南沿海、东海、南海群岛和台湾及海南西部
			太阳能夏季大，冬小；风能冬春大，夏季小	ⅡA_{17a}	松花江下游
9	太阳能可利用	风能较丰富	同上	ⅡB_{18a}	黄河沿岸
			太阳能夏季大，风能春和夏末大	ⅡB_{19d}	浙江东北部
			太阳能、风能夏末秋初最大	ⅡB_{20c}	东南沿海 50～100 km
			太阳能夏季大，冬季小；风能冬、春季大，夏季小	ⅡB_{21a}	松花江上游
10	太阳能可利用	风能可利用	同上	ⅡC_{22a}	福建西部、江淮下游、华北南部、关中和川西
			太阳能风能夏末秋初最大	ⅡC_{23c}	两广沿海
			太阳能、风能春季最大；夏季风能最小，太阳能较大	ⅡC_{24b}	辽宁大部和吉林南部
			太阳能夏季大，冬季小；风能冬、春季大，夏季小	ⅡC_{25a}	大、小兴安岭
11	太阳能可利用	风能欠缺	太阳能、风能变化一致，春大秋小	ⅡD_{26e}	云南西部及南部
			太阳能夏季大，冬季小；风能冬、春季大，夏季小	ⅡD_{27a}	东南丘陵及南岭山地
12	太阳能欠缺	风能可利用	同上	ⅡC_{28a}	洞庭湖和鄱阳湖周围
			同上	ⅡD_{29a}	川东、川南、贵北、湖南大部、湖北、陕南
13	太阳能欠缺	风能欠缺	太阳能、风能春季最大；夏季风能最小，太阳能较大	ⅡD_{30b}	成都平原
			太阳能风能变化一致，春大秋小	ⅡD_{31e}	贵州西部、云南东北部

（2）太阳能丰富区、风能较丰富区分布在紧靠ⅠA区的内蒙古和甘肃的河西走廊ⅠB_{02a}，这一区的太阳能和风能的天气和气候的成因与ⅠA_{01a}区相同，风速小些。有风库之称的安西，新疆著名的三个泉到后沟的“三十里风区”和鄯善东北部红旗坎到哈密西的“百里风区”也都在这一地区。另一个区在青藏高原北部ⅠB_{03a}，全国最大的年总辐射量在这一区。该区大气透明度高，降水少，纬度又较低，海拔高，空气稀薄，所以辐射强度大。从现有的气象资料来看，青海的冷湖，日照时数可达 3 602.9 小时，1 年中平均每天有9 小时 52 分钟的日照时间，年日照百分

率为 81%，为全国之冠。这一区的风能较丰富，主要由于海拔高，空气密度小，使风能密度较小。若按≥3 m/s 的小时数来看，这里可达 5 000 小时，相当于风能丰富区。

(3) 太阳能丰富、风能可利用区，分布在塔里木盆地南部、青藏高原的东部和南部、甘肃、宁夏的一部分 $\mathrm{I\,C_{04a}}$。

这一区基本上是青藏高原边缘的祁连山、六盘山等地区，冷空气一般绕过这些地形东南而下，所以风力较小。由于云量少，太阳总辐射量大。该区太阳能的月际变化仍是有相位差的地区。这一区应以开发利用太阳能为主，风能为辅。

(4) 太阳能丰富、风能欠缺区，分布在雅鲁藏布江河谷 $\mathrm{I\,D_{05a}}$，和塔里木盆地 $\mathrm{I\,D_{06a}}$。雅鲁藏布江的拉萨有日光城之称，太阳辐射年总量在 2 500 kW · h/m^2 以上，是全国最大的。塔里木盆地、哈密年日照时数为 3 413.9 小时，日照百分率达 77%。这两个地区太阳能是很丰富的，但由于四面环山，风能很小，基本上无利用价值。

(5) 太阳能较丰富、风能丰富区，分布在两个地区。一个在内蒙古锡盟 $\mathrm{II\,A_{07a}}$，它与 $\mathrm{I\,A_{01a}}$ 相似，只是太阳能较小些。另一个在辽东半岛沿海 $\mathrm{II\,A_{08a}}$，由于该半岛突出在海上，三面受海洋的影响，风力较内陆大。这一区是我国太阳能-风能联合利用的良好地区，特别是辽东半岛沿海，是我国沿海唯一的太阳能较好、风能最佳区。

(6) 太阳能风能均较丰富区，分布在三个相互隔离的地区。这与具体地形有关。一个在渤海沿岸 $\mathrm{II\,B_{09a}}$，因受海面的影响，风力较大；一个在内蒙古的哲盟和昭盟 $\mathrm{II\,B_{10a}}$，因受大兴安岭余脉的影响，风力较东部大；一个在准噶尔盆地 $\mathrm{II\,B_{11a}}$，因南面为天山，阻碍冷空气南下，特别在冬、春季，盆地成为冷空气南下的通道，风力较大。但在这一区的阿拉山口，风能密度可达 685 W/m^2。该区虽属风能较丰富区，但在一些山口可以达到风能丰富区。北疆年降水量为 200～400 mm，而南疆年降水量仅 50 mm 左右，有的地方还不到 10 mm，云是影响辐射的主要因子，因而北疆比南疆的太阳辐射小。

这三个区的太阳能和风能的年变化曲线都属于有相位差的，可以匹配利用。

(7) 太阳能较丰富、风能可利用区，这一区分布在三个地区：天山山脉和塔里木盆地北侧 $\mathrm{II\,C_{12a}}$，华北大部、陕北、甘肃和青藏高原的东侧 $\mathrm{II\,C_{13a}}$ 及辽宁和河北交界地区 $\mathrm{II\,C_{14b}}$。这区是一个过渡带，太阳能由丰富区过渡到较丰富区，风能由较丰富区过渡到可利用区。在 $\mathrm{II\,C_{14b}}$ 区，两种能源都在春季最大，夏季才有明显的相位差，利用上与全年有位相差的地区不同，在 4、5 月份正当农业需要用能的时候，风能和太阳能可同时利用是其优点。

(8) 太阳能可利用、风能丰富区，分布在三个地区。山东半岛沿海区 $\mathrm{III\,A_{15a}}$，它和辽东半岛相似，但太阳能低了 1 个等级。东南沿海、东海、南海群岛、台湾及海南的西部区 $\mathrm{III\,A_{16c}}$，这一区的风能为全国最大的，风能密度可达 500 W/m^2 以上。这一区秋季的风能密度大，是由于台风活动频繁所致。还有一个是松花江下游区 $\mathrm{III\,A_{17a}}$。这 3 个地区的太阳能虽属可利用区，但在 7～9 月还是很好的。特别应指出的是东南沿海，海域面积较大，且有台湾海峡的狭管作用，是发展风电场比较合适的地区之一。

(9) 太阳能可利用、风能较丰富区，分布在四个地区。黄海沿岸区 $\mathrm{III\,B_{18a}}$，这一区由于台风影响不大，且无狭管作用，所以风能较东南沿海小，成为风能较丰富区。浙江东北部 $\mathrm{III\,B_{19d}}$，这一区太阳能和风能位相不一，太阳能在长江以南最大值出现在 7～8 月份。东南沿海 50～100 km 地带、台湾、海南的东部区 $\mathrm{III\,B_{20c}}$，本区和 $\mathrm{III\,A_{16c}}$ 相同，就是风速小些。松花江上游区 $\mathrm{III\,B_{21a}}$，这是由于大小兴安岭构成的喇叭口使风速加大之故。这四个区，实际上前三个区是连成一片

的，只是风能、太阳能位相不同而已。其中ⅢB$_{18a}$是传统利用风能地区。

(10) 太阳能、风能均可利用区，散布在四个地区。华北南部、江淮下游、福建西部、关中、甘南和四川西部（ⅢC$_{22a}$），该区面积很大，和ⅡC$_{13a}$相似，只是太阳辐射年总量较小。两广沿海区（ⅢC$_{23a}$），太阳能、风能秋季最大，春季风能较小。辽宁大部和吉林一部分（ⅢC$_{24a}$），太阳能与风能春季大，夏、秋有位相差。大小兴安岭山地区（ⅢC$_{25a}$），该区风速较小。

这 4 个区实际上是季节可利用区。由于太阳能、风能在某一季节都很丰富，但全年平均能量小些，故成为可利用区。

(11) 太阳能可利用、风能欠缺区，分布在云南西部及南部（ⅢD$_{26a}$）和东南丘陵及南岭山地（ⅢD$_{27a}$）。这两个区的风能密度都很小，仅 30～40 W/m^2，云南景洪年平均风速仅 0.4 m/s，是全国风速最小的地区。广东梅县仅 0.9 m/s，这里的风能基本上不能利用。太阳能可季节性利用，如景洪在旱季的 4、5 月，韶关在夏季的 7、8 月，太阳能还是较丰富的。

(12) 太阳能欠缺、风能可利用区，分布在洞庭湖和鄱阳湖区（ⅣC$_{28a}$）周围。这里受水面的影响，风速较大，太阳能虽属欠缺区，但处于分区标准的上限，夏季仍可利用。

(13) 太阳能、风能都欠缺区，这一区很集中，它以四川为中心，向四周扩展。但由于太阳能和风能出现峰值不同，又可分为四川东部和南部、贵州北部、湖南大部、鄂西、陕南ⅣD$_{29a}$，成都平原ⅣD$_{30b}$及贵州西部和云南东北部ⅣD$_{31a}$3 个类型区。这一区太阳能和风能从大范围来看是全国最小的，如四川的灌县、峨眉、雅安太阳年总辐射量为 930 kW·h/m^2，有效风能密度仅 30 W/m^2 左右，年平均风速仅 1.0 m/s 左右，这一区无论是太阳能还是风能都很难利用。

第三章 建筑与气候

第一节 概 论

建筑工程是为人类建造各种为工作、学习、生活娱乐的环境。随着社会的发展，人们生活的提高，人们要求的建筑物的水平愈来愈高。建筑物常年受着各种天气气候条件的影响，因此，建筑设计、建筑规划、建筑施工和建筑管理等部门均应加以考虑，以充分适应和利用当地的气候特点，尽量避免和改变气候不利的一面。相反地，建筑物建成后，对局地小气候也会产生影响。建筑气候学就是研究建筑物适应气候特点，创造适宜的室内小气候及建筑的气象效应的科学。换句话说，也就是研究建筑与气候之间的相互作用的规律的学科。

由于世界各国气候的差异，所以，形成各种不同的建筑形式和建筑风格。但现代建筑特别是公用建筑，一个非常明显的特色是，尽管所在的气候带不同，许多建筑的一般形状都很相似。这样就导致楼房的室内气候对人们生活的影响，可能夏天太热，冬天太冷，使人们感到不舒适。

在一定的气候条件下，为了得到合适的建筑结构，风、雪荷载是首要问题，它是建筑物安全的保障。太阳辐射、建筑物的朝向、窗户的位置及通风口等，它是考虑建筑物满足人们舒适的生活环境的因素。

气象要素对建筑物的影响几乎是全方位的，要想建造一个良好的建筑物，必须合理地利用当地的气候特征。建筑规划和设计与气象要素的关系如表 3.1.1。由表中可以看出，气象要素对建筑物的影响几乎是全方位的。

表 3.1.1 建筑规划和设计与气候要素（“/”表示与该要素有关）

项目	日射	日照	气温	湿度	风	雨	雪	冻土
建筑方位	/		/		/			
建筑密度		/						
建筑层数		/			/			
建筑间距		/						
街坊布置		/						
城市绿化		/			/			
城市座落		/			/	/		
采光面积		/						
建筑外形		/	/			/		
室内高度			/					
房间进深		/						

（续表）

项目	日射	日照	气温	湿度	风	雨	雪	冻土
房间朝向		/						
门廊形式			/		/			
外廊				/				
阳台		/	/					
凉台			/					
通风			/	/	/			
门窗层数		/	/		/			
伸缩缝			/					
隔热	/		/					
防寒	/		/		/			
遮阳	/	/	/					
外墙厚度	/		/		/			
墙壁材料	/		/	/				
屋面做法						/		
屋面坡度			/		/	/	/	
屋面材料	/		/			/		
屋面形式			/		/	/		
屋架结构			/		/		/	
基础结构					/			
基础埋深								/
排水设计						/		/
装饰材料		/	/	/				
装饰色泽		/	/					

我国建设部出版《建筑气象参数标准》(试行)，选取全国 209 个城镇，每个城镇列出 55 个项目建筑与气象参数及气候特征分析。

我国幅员辽阔、地跨热带、亚热带、温带几个气候区。地形复杂有世界最高的青藏高原，低于海平面 154 m 的吐鲁番盆地。各地气候千差万别，对建筑物影响也各不一样。在建筑规划设计时，充分考虑气候资源和防御气候极端值的影响，可以取得良好的社会和经济效果。以确保建造出安全、经济和适用的建筑物，创造良好的工作、生活和娱乐的环境。

诚然，现代化的空调有可能调节好工业过程、人们生活等所必须的室内小气候。然而最好还是使建筑“协调于气候，而不是对抗于气候”。也就是说，要研究当地气候资料，适应气候以至用最低的费用实现室内最适宜的微气候环境。

第二节 城市规划与气候

城市规划需要气候信息，然而在这一点上却往往被忽视。在大多数情况下，城市规划主要考虑经济性。对气候影响城市的发展考虑的较少，致使很多城镇大气污染严重，日照间距、建筑朝向不合理等。

城市规划是城市建设和经济建设的一个重要环节，既要有现实意义，又要有科学预见性。

为子孙后代奠定一个良好基础。

人与自然环境是相互依存、相互影响，对立统一的整体。人类向大自然索取资源多，抛向大自然的“三废”多，使环境失去平衡，就会出现环境污染，其中大气污染尤为严重，直接危害人类的健康。

大气污染主要是由于人类在生产和生活中不合理排放有害气体造成的。因此，在城市规划和工业布局中，需要把气象因素，特别是风和气温对城市规划的影响，作为一个基本因素考虑。

在新兴城镇或开发区的住宅与工矿企业的选址，在旧城镇的改造都应充分考虑气候影响，确定工业区、住宅区和旅游区设置在最佳的位置上，使人们舒适健康地生活在城市里。

一、风与城市规划

风对城市的影响，从控制空气污染的角度来看，主要是对空气污染物的自然输送和稀释，它能使城市空气清新。风向决定污染物输送方向，风速的大小决定对污染的稀释能力。因此，根据一地的风向和风速的气候特点，将能进行正确的城市规划中的各功能分区。以减少城市居住区的大气污染。

风在城市规划中是一个最先应用的要素。1914 年 Schmauss 最先提出，按主导风向进行城市规划。将工业区布置在主导风向的下风向。经过了几十年实践证明还是可行的，但并不完善，对一些地区如季风区就不适用。因为冬季风和夏季风一般是风频相近，风向相反。也就是冬季是上风向，夏季变为下风向。以后有很多人提出了改进意见，如污染系数法、污染指数几率法、城市多源模式法、污染指数法等，这些方法在理论上均有所改进。但除了需要计算大量的资料，有些资料还属非常规观测，给计算带来很大困难，而且各种方法仍有不少缺陷，利用任何一种方法作城市规划也不能尽善尽美。因为城市规划与气象本身就很复杂，许多问题尚未得到合理的解决，目前我国城市规划仍以风为主要考虑依据。

(一)地面风与城市规划

大气环流决定气流的流形，局地气流又受地形、海陆等的影响。一地风型往往受几种因素控制，而且人工建筑也会改变这种风型。所以，规划工作者必须判明除了判断大气候的影响，还要判明改变了的风型对空气污染、气流方向和热岛成因等可能的影响。

一个城市能够通过规划来减弱热效应和空气污染的影响，通风条件是非常重要的。城镇规划、旧城市改造都要避开通风不畅的污染源区或易于发生的低层逆温层的地区。但是，污染状况常是随静风或方向不定的微风而变得严重，所以城市规划要根据当地风的状况来确定其功能分区。

表示风向的变化，一般用风玫瑰图。它是在极坐标图上绘出一地在一年或各月时间内，各种风向出现频率或各种风向下的平均风速。

根据我国冬、夏季风向玫瑰图变化形状，将全国分为季节变化型、主导风向型、无主导风向型和准静风型 4 个类型区。如图3.2.1。

1. 季节变化类型区

这一区域盛行风向随着季节的变化而转变，冬、夏季风向基本相反，根据季风定义，季风现象必须是风向或气压系统有明显的季节变化。将 1 月、7 月风向变化大于 135°、小于等于 180°者称为季节变化型(下称季变型)。从图 3.2.1 可以看出，大致分布在我国东部，从大兴安岭，经过内蒙古穿河套、绕四川东部到云贵高原一线以东地区。

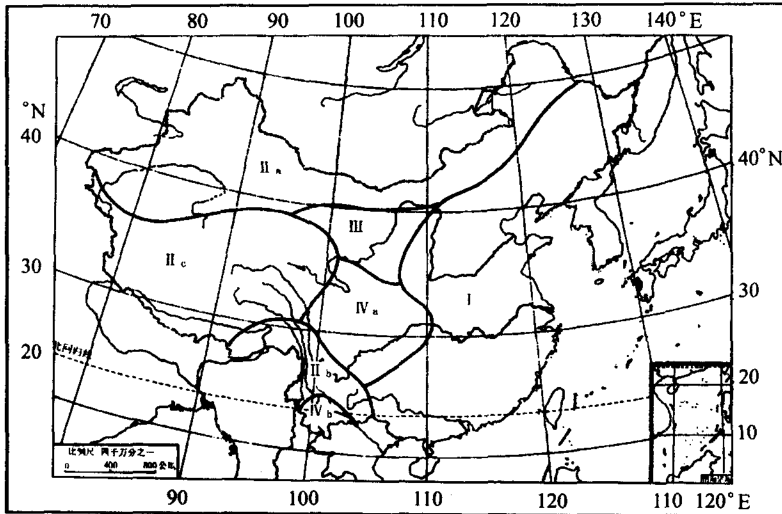


图 3.2.1 城市规划风向分区图

季变型风向稳定，一般冬季或夏季盛行风向频率在20%～40%，夏季较冬季为小。如南昌1月北风为27%，2月西南风为19%，冬季比夏季多8%，又如平潭岛，1月东北偏北风为48%，7月西南风为32%，冬季盛行风向频率比夏季多16%。假若再将盛行风向左右各一个方位加在一起，其频率可达50%～70%以上。

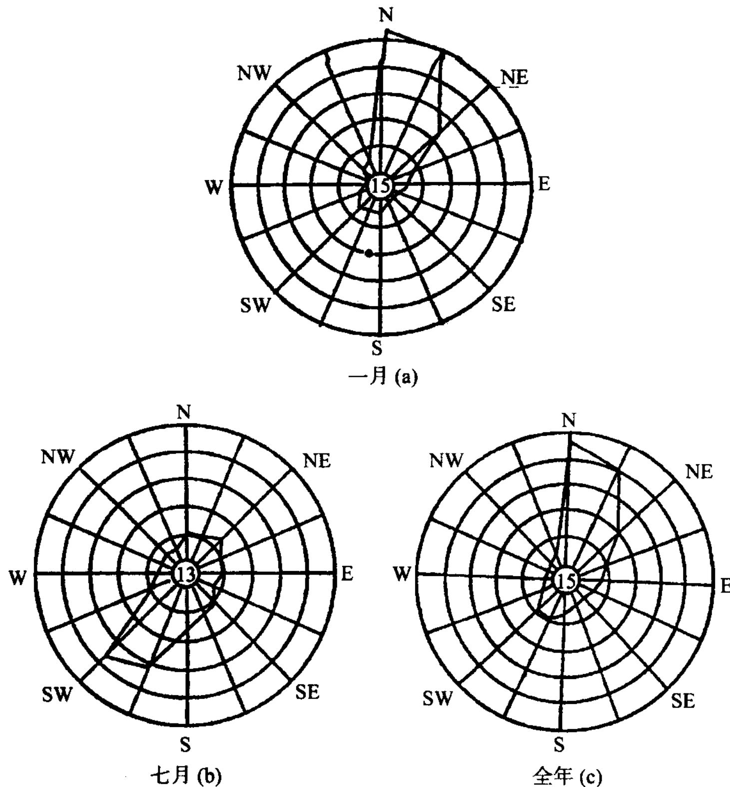
在季节变化型地区城市规划时，不能仅用年风向频率玫瑰图，如南昌年平均风向玫瑰图(图，3.2.2c)，由图可以看出全年盛行北风，实际上在夏季的月份西南风的风频还是很高的。如图3.2.2b。所以在季变区内城市规划要将1月、7月风向玫瑰图与年风向玫瑰图一并考虑，才能做出较准确的规划。

在季节变化型地区内进行城市规划所采取的对策，应是避开冬、夏对吹的风向，选择最小风频的方向，因为从该方向来的污染机会最少。故应将向大气排放有害物质的工业企业，按最小风频的风向，布置在居住区的上风方向，以便尽可能地减少居住区的污染。以图3.2.2为例，冬季盛行北风，风频为27%，再加上相邻风频为52%，夏季盛行西南风为19%，再加上西南偏南风为36%，在北与东北偏北和西南与西南偏西间风向夹角为135°～180°，冬、夏风向基本相反，再参照全年风频玫瑰，最小风频的方向为北西偏西，风频为0.6%，所以应将向大气排放有害物质的工业企业布置在城市的西北偏西方位上，居住区在东南偏东方位上。

此外，若冬、夏风间夹角<112.5°时，可将居住区布置在夹角之内，而在其相对应方向布置排放有害物质的工业企业。

2. 主导风向类型区

所谓主导风向型，即一年中基本是吹一个方向的风。这种类型分布在3个地区。见图3.2.1。一个地区是新疆、内蒙古和黑龙江北部(Ⅱa)，这一区常年在西风带控制之下，风向偏西，即使盛夏也很少受热带海洋来的季风影响。如内蒙古全年逐日的西南、西南西、西风的频率和为47%，其他各风向频率都在8%以下，又如黑龙江爱辉西北偏西、西北、西北偏北风频率和为49%，其他各向风频在5%以下；另一个地区是云贵高原西部(Ⅱb)，常年吹西南风。虽然全年吹西南风，若按风的性质和天气状况来看，该区属西南季风区。冬季风(11～4月)，都来自南



一月 (a)

七月 (b)　　全年 (c)

图 3.2.2　南昌风向频率玫瑰图

支西风带，从北非经巴基斯坦、印度、孟加拉，沿喜马拉雅山南麓平流过来，风向偏南，由于来自亚洲南部干燥地区，雨量很少，所以称这个季节为“干季”。夏季风(5～10 月)风向也是偏南，但风来自印度洋，经孟加拉湾、缅甸到云贵高原，因为来源于海洋水汽丰富，雨量集中，故称这个季节为“雨季”。例如该地区的昆明全年主导风向是西南风，1 月、7 月也是以西南风为主导风向(图 3.2.3)。由图可见，西南风的频率为 19%，加上南、西南偏南和西南偏西风频可达 41%，昆明静风频率为 31%，还有 28%分布在其他 12 个方位上，每个方位平均 2.2%，1 月、7 月偏南风更为集中。第三个地区是在青藏高原(Ⅰc)，这里的风向变化很复杂，最低层为山谷风，山谷风之上为一冬季盛行偏西风，夏季盛行偏东风的交替高原季风，在高原季风之上为终年不变的行星风层。在青藏高原最低一层的山谷风，因为高原山风或谷风得不到发展，不像其他山区的山谷风那样昼夜转换，而且整天吹一个方向的风，如喜马拉雅山北坡，昼夜都吹南风(山风)，谷风得不到发展，以定日为例，一年主要吹偏南风。从年频率来看，偏南风为 49%，加静风 29%，共 78%，可见主要是山风，而在高原北坡昼夜都吹北风(谷风)，山风得不到发展，由于城市规划考虑低层风就可以了，故将青藏高原归于主导风向型。

在主导风向型 3 个地区里，虽然造成主导风向的原因不同，但从风向来看，终年基本不变。由于污染区总是在污染源的下风方向，且风向频率越高，其下风侧污染机会越多，所以将向大气排放有害物质的工业企业布置在常年主导风下风侧，居住区布置在主导风的上风侧。

3. 无主导风向类型区

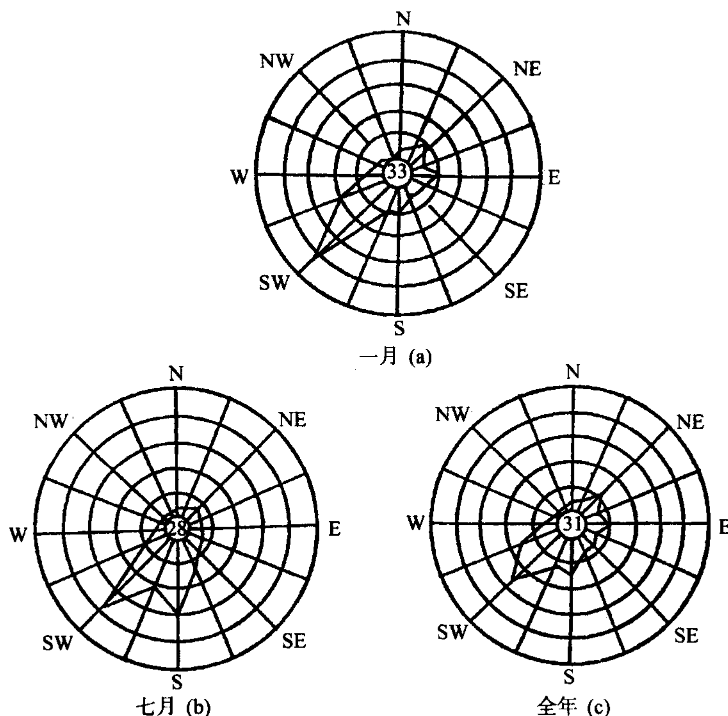


图 3.2.3 昆明风向频率玫瑰图

无主导风向类型全年风向不定，各向风频相差不大，一般在 10%以下。

无主导风向型主要分布在宁夏、甘肃的河西走廊和陇东以及内蒙古的阿拉善左旗等，如图 3.2.1 中Ⅲ。在冬季影响我国的 4 条冷空气路径，都不同程度地影响该区，风向多变。夏季偏南风也很难到达这里，而冷空气还时常南下，所以形成这一个区域各个风向频率相当，如图 3.2.4。

由图可见，最多风频也仅 9%，故在这个区里就无上、下风方向之分，也无最小风频之分。在这里城市规划或工业厂房的布局，着重考虑风速(在以上两种类型中，风向是主要的，但也要考虑风速)，也就是风速越大，大气污染物质浓度越低，其污染浓度与风速成反比。为了考虑风速的影响，常用污染系数(烟污染强度系数，卫生防护系数等)来表示，

$$\text{污染系数} = \frac{\text{风向频率}}{\text{平均风速}}, \tag{3.2.1}$$

对公式(3.2.1)提出了修正，

$$\text{污染系数} = f \cdot \frac{2V}{V + \bar{u}}, \tag{3.2.2}$$

式中，f 为定向风频；$\bar{V}$ 为全年平均风速，$\bar{u}$ 为定向平均风速。根据计算，(3.2.1)式与(3.2.2)式无多大差异，但(3.2.2)式在理论上较完善。同时也有人提出可以用矢量和来表示。

在无主导风向型区域里，还可以利用合成风公式计算其合成风的风向和风速。

无论根据以上哪一个公式计算，其城市布局应将向大气排放有害物质的工业企业布置在污染系数最小方位或最大风速的下风方向上，居住区安排在污染系数最大方位或上风方向上。

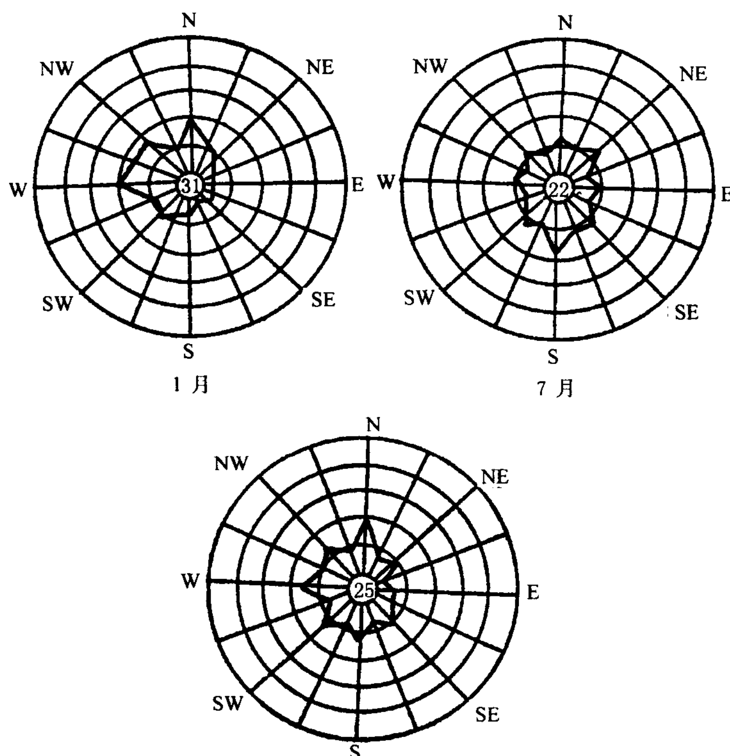


图 3.2.4　乌兰镇风向频率玫瑰图

4. 准静风类型区

所谓准静风，是由于现行的测风仪器，其起动风速都在1.5m/s以上。所以资料中的静风是小于1.5 m/s的风速。若用热电测风仪、超声测风仪可以测出0.01 m/s以上的风速，绝对静风是很少的，故把静风称准静风。

将静风频率全年平均在 50%～60%以上，年平均风速在1.0 m/s以下的地区称为准静风型。由图 3.2.1 可以看出，分布在两个地区，一个以四川为中心，包括陇南、陕南、鄂西、湘西和黔北等(Ⅳa)；一个在西双版纳地区(Ⅳb)。这两个地区从气候角度上分析，前者属东南季风、后者属西南季风，就是由于静风频率高，年平均风速小而划为另区，如绵阳、恩施、阿坝、思南、孟定、景洪等年静风频率都在 65%以上，最高景洪可达 79%，年平均风速在0.9 m/s以下，最小仍在景洪仅 0.5 m/s。

过去城市规划很少考虑静风型，这是极不合理的。在该区进行城市规划时，必须将向大气排放有害物质的工业企业，设置在居住区的卫生防护距离之外。因此，需要计算工厂排放的污染物的地面最大浓度及其落点距离，给出其安全边界，生活在安全界限之外，一般用萨顿(Sutton)理想化浓度分析模式计算最大着地浓度：

$$C_{\max} = \frac{2Q}{\pi e H_e^2 u} \cdot \frac{C_x}{C_y}, \tag{3.2.3}$$

和最大着地浓度距离

$$X_{max} = \left[\frac{H_e}{C_z}\right]^{\frac{2}{2-n}}, \tag{3.2.4}$$

式中,Q 为源强(g/s);H_e 为烟囱有效高度;C_z 为垂直方向扩散能力;C_y 为水平方向扩散能力;n 为稳定度;$\bar{u}$ 为平均风速(>0)。

最大浓度出现的距离与烟囱的高度有关,大致在 10～20 倍烟囱高度之间变化。居住区距离烟囱高度 10～20 倍远之外,基本不受其污染。

1978 年中国预防医学科学院环境卫生与卫生工程研究所制订了《全国工业企业卫生防护距离标准》已完成 11 类工业企业卫生防护距离的估算,如表 3.2.1。由表可见各类工业企业按年平均风速小于 2 m/s,2～4 m/s 和大于 4 m/s,分为 3 种情况计算各自相应的标准卫生防护距离。其计算方法以小于 2 m/s 为例,列计算式如下:

表 3.2.1 工业企业卫生防护距离

工业企业类型	年平均风速(m/s)	标准卫生防护距离(m)	备 注
焦化厂	<2	1400	
	2～4	1000	
	>4	800	
钢冶炼厂	<2	2200	
	2～4	1800	
	>4	1400	
氮肥厂 1.5×10^4t/a 和 2.5×10^4t/a	<2	1200(1600)	括号内为(2.5×10^4t/a)
	2～4	800(1000)	
	>4	600(800)	
黄磷厂	2～4	800	
	>4	600	
硫酸盐厂	<2	1000	
	2～4	800	
	>4	600	
聚氯乙稀树脂厂中小型和大型	<2	1000(1200)	括号内为大型
	2～4	800(1000)	
	>4	600(800)	
铅蓄电池厂大中型和小型	<2	800(600)	括号内为小型
	2～4	600(400)	
	>4	400(300)	
氯丁橡胶厂	<2	2000	
	2～4	1000	
	>4	1200	
硫酸厂	<2	600	
	2～4	600	

（续表）

工业企业类型	年平均风速 (m/s)	标准卫生防护距离 (m)	备 注
	>4	400	
普通过磷酸钙厂	<2	800	
	2～4	600	
	>4	500	
钙镁磷肥厂	<2	1000	
	2～4	800	
	>4	600	

当 $L<1\ 000$ m 时，

$$\left[\frac{Q}{uC_0}\right]=\frac{1}{790}[0.0097L^{1.85}+0.25R^2]^{1/2L^{0.78}}, \tag{3.2.5}$$

当 $1\ 000\ \text{m}<L\leqslant 2\ 000$ m 时，

$$\left[\frac{Q}{uc_0}\right]=\frac{1}{170}[0.0155L^{1.08}+0.25R^2]^{1/2L^{0.78}}, \tag{3.2.6}$$

当 $L>2\ 000$ m 时，

$$\left[\frac{Q}{uC_0}\right]=\frac{1}{170}[0.0155L^{1.80}+0.25R^2]^{1/2L^{0.57}}, \tag{3.2.7}$$

式中，L 为卫生防护距离(m)；Q 为特征大气污染物无组织排放量规化源强(kg/h)；u 为计算风速，取 3.0 m/s；C_o 为特征大气污染物居住区一次最高允许浓度(mg/m^2)，当《卫生标准》未规定一次最高允许浓度时，可取日平均允许浓度的 3 倍；R 为源等效半径(m)，根据源的面积 S 求出，即 $R=\sqrt{\frac{S}{\pi}}$。

在上列算式中各参数确定后，L 用逐渐逼近法计算。按上列公式计算工业企业所需卫生防护距离后即可分类确定其级别，在 50～100 m 以内，按国家标准(GB3840-83)分为 8 级。大于 1 000 m时，级差为 200 m；小于 50 m 时，级差为 10 m；当计算值在两级之间时，一般取偏宽的一级。但当级差为 200 m 而计算值与较低的一级的差不大于 50 m 时，也可取较低的一级。

卫生防护距离的计算不仅局限于年平均风速小于 2 m/s 风速，在其他 3 个类型中也要计算，不过在准静风型显得更为重要些。

（二）局地环流与城市规划

以上季节变化、主导风向、无主导风向和准静风 4 个区是以大尺度划分的，实际上由于地形、水体等造成的局地环流影响，各区中都有个别地区风向类型完全不同，如在季节变化区中也有主导风型或无主导风型等。

1. 山谷风环流和海陆风

山谷风环流白天由山谷吹向山顶为谷风，夜间由山顶吹向山谷为山风，与季风环流所不同之处，是它以 1 日为周期变化的风向。但在年风向玫瑰图上两者很相近。故将局地环流的风向频率称双主导风向型。双主导风向型在城市规划时所采取的对策与季节变化型相同。

在山区谷地建立工厂时，总体规划要考虑山地处于那一个风向类型区，如在季节变化区，

厂址尽可能选择走向接近南北谷地，与季风风向一致，有利于扩散。在主导风向区，也应该选在与风向平行的山谷。

海陆风或湖陆风在 1 日内风向也是有规律的变化，白天风从海(湖)上吹向陆地称为海(湖)风；夜间从陆地吹向海(湖)面称为陆风。在海陆风和湖陆风影响的地区进行城市规划或工厂总体布局时，应该将工业企业和居住区分别布置在垂直于海(湖)陆风的方向，也就是工业企业和居住区的布置平行于海(湖)沿岸，这样污染的机会最小，否则在 1 日中有一段时间居住区处于下风侧，受到有害物质的污染。

2. 城市风

由于城市化的影响，城区大气边界层的物理和化学性质都会产生变化。不仅城市上空的大气被固态、液态和气体混合物所污染，而且气流、气温和降水等要素与乡村相比都有不同。因而便形成特殊的城市气候。

城市规划不仅必须考虑较大尺度的城市气候特征，还应考虑人为改变这些特征后引起的局部气候特点，同时判明改变后的气候对空气污染、气流型式、热岛成因和水体循环等的可能影响。可是在很多情况下，人们往往忽视城市气候在城市规划中的运用。所以城市规划考虑气候影响再结合考虑社会经济和其他制约因素，才可以形成最佳的气候环境。

城市地表粗糙度的加大和温度的提高，使中尺度气流发生重大变化。使得风从郊区吹向城市称为城市风。

由于城市风的出现，城市的污染物随热空气辐合上升，往往在城市上空笼罩着一层烟或 CO_2 等形成的穹形盖，称为城市覆盖层。它可使上升的气流受阻，污染物不易扩散。所以上升气流到达穹盖高度后转向水平运动，到达郊区后下沉。下沉气流又沿近地层流向城市的中心。若城市的四周有工业企业，它排出的污染物也一并集中到城市中心，致使城市空气更加浑浊。造成了市区严重污染。

(三)近地层风与城市规划

目前城市规划中使用的大都是地面 10 m 高度处的风向风速。但是近地面层(100 m 以下)风速随高度增加而增大。风向也向右偏。这一点对企业、工厂的烟囱设计十分重要，如考虑不周，工业企业建成后，地面风可使原来认为不受污染的地区成为污染区。

1. 近地层风速变化

风速随高度的增加而增加，意味着污染风(小于 3 m/s 的风)的出现机会随高度增加而减少，这一点可以从武汉铁塔资料统计看出，表 3.2.2 中 10 m 处的小风(≤1 m/s)次数为 169 次，146 m 处为 95 次，后者仅是10 m处的 57%。乔治(Georgii)等 1967 年研究莱茵河上法兰克福 CO_2 的分布，发现它的浓度在街的背风面比迎风面要高出几倍，这主要由于背风面风速小于迎风面，地面风速小于上面风速，所以愈近地面浓度愈大，如图 3.2.5。因此，在城市规划时，必须考虑这一影响。

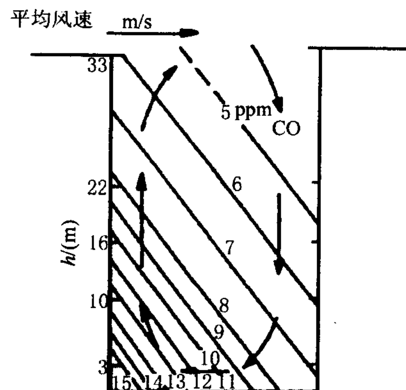


图 3.2.5 一个街道上一氧化碳的垂直剖面

表 3.2.2 风速≤1.0 m/s 武汉铁塔各高度的次数与比值

项 目	高 度(m)								
	5	10	15	20	30	62	87	119	146
小风次数	236	169	145	129	111	116	110	111	95
与 10 m 处之比值	1.39	1.00	0.85	0.67	0.66	0.69	0.65	0.66	0.57

2. 近地面层风向变化

在行星边界层(500～1000 m)中,风向随着高度的增高而逐渐向右偏转,也就是按顺时针方向偏转,慢慢地接近地转风风向。根据南京跨江的两个铁塔相接(长江北岸 123 m 有一铁塔,南岸在 73.3 m 高的小山上另有 195.5 m 铁塔)的资料分析,得出风向右偏的趋势,如表 3.2.3。由表可见,风向右偏的角度、几率均随高度增加而增加,在 75～95 m 处右偏 1～2 个方位(22.5～45°)的百分比仅 32%;而 107.9～219.3 m 处右偏 1～2 个方位的百分比增加到 70%,另有 8%的向右偏 3 个方位以上。利用 1976～1979 年在这两个铁塔上取得的资料,对 112 m 和 64 m 两个高度进行了风向偏转的频率计算,如表 3.2.4。表中正值为从 64 m 上升到 112 m,风向向右偏转。右偏一个方位的约占 50%稍多一些,左偏(负值)一个方位仅 1.8%～3.3%。如果将零和右偏的频率合并计算,达 84.3%～92.8%。同时,从表中还可以看出一年四季风向都存在右偏,而且频率相当均匀,最多频率和最小频率仅相差3.7%。

表 3.2.3 南京跨江铁塔各种起讫高度风向偏转的方位数和次数

起讫高度	右偏				不变 几率(%)			左偏			
	≥5	4	3	2	1	0	−1	−2	−3	−4	−5
75～97(m)	0	0	0	1	31	62	5	1	0	0	0
107.9～219.3(m)	3	3	2	21	49	17	4	0	0	0	0
31～219.3(m)	4	4	12	36	33	5	4	1	0	0	1

表 3.2.4 南京跨江铁塔 112 m 和 64 m 高度风向偏转($D_{112}-D_{64}$)频率(%)

季节	偏 转 方 位									
	−7—4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5—7
春	0.2	0.1	1.0	3.3	33.8	50.5	9.3	1.4	0.3	0.05
夏	0	0.1	0.3	2.7	37.7	51.5	6.0	1.1	0.5	0.07
秋	0.2	0.2	0.2	1.8	41.2	51.6	3.9	0.5	0.3	0
冬	0.3	0.1	0.4	2.6	34.5	54.2	6.7	0.8	0.5	0
年	0.2	0.1	0.5	2.6	36.8	51.9	6.5	1.0	0.4	0.03

在对武汉铁塔资料计算时,也发现小风的最多风向存在着右偏。所以在城市规划或工厂总体布局时,不能仅以地面风向为依据来推断空气污染物的轨迹,还要考虑近地层风向右偏的特征。

二、气温与城市规划

大气垂直稳定度也是决定大气中污染物稀释的一个重要因素。温度层结是决定大气垂直

运动稳定程度的原因。大气稳定度可以分为三种状态。一种是不稳定大气，白天地表面受到太阳辐射而增温，并使近地面空气的温度升高，这时近地面的空气密度比上空的小，很容易发生上下空气的对流扰动，因此大气就处于不稳定状态。如果这时向大气排放污染物，由于大气对流旺盛很容易稀释。另一种是稳定大气，在晴空的夜晚，地面因辐射而冷却，此时地面附近的空气温度比上空要低，这就产生所谓逆温。逆温会抑制大气垂直运动和湍流活动，不利于空气中污染物的扩散。第三种是中性大气状态，温度随高度的下降同绝热递减率相近，这时上升或下沉的气流的气体与周围大气之间没有温差，不影响空气微团在其中运动，从而对空气中污染物的垂直扩散不发生很大的影响。

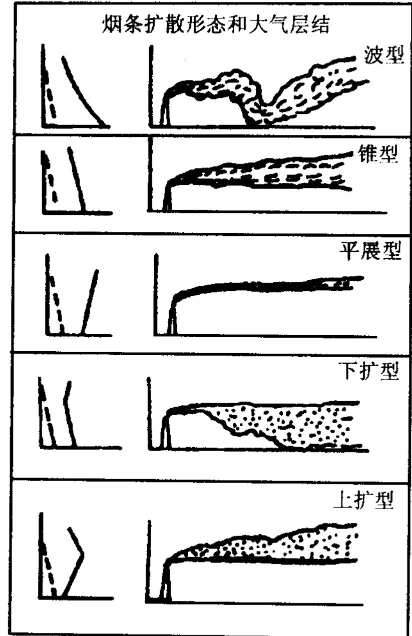


图 3.2.6 各种温度层结烟流扩散情况

在近地面层不同大气稳定度情况下，烟流散布型式和造成的地面浓度分布各异，如图3.2.6所示的 5 种情况(图中左侧实线为廓线)。烟形状不仅与温度层结有关，还与风速有关。当然，在平坦地形、热力因子为主导条件下的情形，实际情况比此复杂些。

从城市规划的角度来说，气温的垂直分布也必须考虑。作为烟囱下扩型发生的条件，是逆温的情况，如果有效烟囱高度超过逆温层，几乎可以避免这种污染。

逆温往往又伴随着小风，污染物就更不容易迅速扩散、稀释，所以使地面污染浓度增加。逆温可以分为贴地逆温和高架逆温(不贴地)。按其形成过程可分为五种，如表 3.2.5。

表 3.2.5 不同条件下形成的 5 种逆温

分类	成因	出现时间和条件	特点	影响
辐射逆温	无大天气系统影响的晴夜，地面剧烈降温，临界风速 2.5m/s	日落后形成，午夜最大，逆温厚度日出前最大，日出后从上而下被破坏	常年可见，冬季最强	逆温破坏时易形成熏烟型扩散
平流辐射	暖湿空气平流到冷地面上或水面形成	可出现在任何时刻，一般范围较大	暖湿空气与冷表面温差越大，逆温强度越大	
下沉逆温	整层空气下沉压缩增温而形成	极地冷高压和副热带高压中心附近		对高架源影响大
湍流逆温	低层空气湍流混合而形成	常出现于大气中非湍流层和其下紧贴湍流层间	较浅薄	
锋面逆温	锋面倾斜，过渡区上下冷暖空气温差大时形成	仅在冷气团控制的地区观测到	观测点相对距离地面锋线位置越近，逆温高度越低，反之越高	

在实际观测中发现逆温层有时可以分为两层：第 1 层平均顶部高度 80～90 m；第 2 层平均底部高度 200 m 左右；但不同地区、不同地形、不同时间会有所变化。在城市规划时，烟囱至少在第一层顶部高度以上。

三、日照与城市规划

城市建设中，大都用日照间距控制建筑物高度。但城市建筑是群体结构，建筑物对某一地点遮挡阳光的时间不仅和建筑物的高度有关系，而且和建筑物的布局、朝向和长度有关。

(一)日照与街道方位

街道不仅是交通的动脉，而且是气流和阳光的通道。所以城市规划时，要考虑多数住宅有较好的日照条件。日照条件与街道网的方位有很大关系，因为道路的方位就可以确定建筑物的朝向，进而也决定了日照条件。因此，在确定街道网方位时，除考虑交通外，主要应使规划区域内居住建筑物能得到较好的日照条件。虽然现代化的建筑有空调，冬暖夏凉，但使楼房采光好，有阳光照射仍是重要的，所以在城市规划时，要充分利用日照这个资源。

一个城市有东西走向，街道两旁建筑物是朝南朝北的，同时，必然有南北走向，街道两旁建筑物是朝东朝西的。在北方地区朝北和朝西的方向是最不好的方向。为了避免这种情况，从日照要求考虑，在规划居住区时，宜使城镇街道采取南北向和东西向的中间方位，也就是使街道采取与子午线成 30°～60°之间方位。这样，就保证了整个居住区街道两侧所有建筑物都有比较好的日照条件。

(二)居住建筑的日照间距

居住区日照环境对于保证居民的健康，满足居住区功能要求，创建一个舒适、优美的居住环境来说是非常重要的。群体建筑中的各种关系非常复杂，要准确地分析这种关系，需要使用计算机模拟。在日常的建筑实践中，一般是通过计算建筑物的日照间距来保证建筑物有一定的日照时间的。计算建筑物日照间距需要事先确定建筑物应保证的最少日照时间，这段日照时间出现的时段，以及日期。

建筑日照时间的标准日，即是考虑最不利的情况，一般在冬至日左右，这时太阳高度角为 1 年中最低的，只要这一天能达到建筑日照时间的要求，其他所有时间都能满足要求，但往往使建筑间距太大。1986 年北京城市规划管理局建筑日照科研组进行大量的工作，并计算了不同节气日的日照时间对应的间距系数如表3.2.6。

表 3.2.6　北京日照时间和间距系数

节气 / 日照时间	冬至	大寒	雨水	春分
2 h	1.89	1.64	1.18	0.78
3 h	1.96	1.71	1.20	0.78

太阳直射光是通过窗口射入室内的，因此，计算住宅建筑的每个居室窗户的日照时间，更能说明该建筑物的日照状况。但这首先要决定是以冬至为标准日还是以春、秋分为标准日，这直接影响到建筑物的间距。前苏联是以春、秋分为计算日照时间的标准日，前苏联还规定在 7～11h时的有效时间带内连续日照 3 h，所以他们的建筑间距为前面楼高的 2.7 倍(称此为建筑间距系数)。日本以冬至为计算日照时间的标准日，按不同纬度把全国分为 3 个区，允许的建

筑容积率分别是每公顷 5 000～15 000 m^2，20 000～30 000 m^2，20 000～40 000 m^2。北京日照间距系数为 1.6。这是以大寒作为日照时间的标准日，一层楼全窗日照 2h 左右确定的。

计算日照间距 D_0 的公式

$$D_0 = H_0 \cdot \mathrm{ctg}h \cdot \cos A, \tag{3.2.8}$$

式中，H_0 为前栋建筑物计算高度，h 为太阳高度角，A 为后栋建筑物墙面法线与太阳方位的夹角。在多层行列式住宅建筑间距系数，每增加 0.1，居住建筑毛密度大约降低 600 m^2/hm^2。由表3.2.6可见，北京若以冬至日为标准日比大寒为标准日，要少建1500 m^2/hm^2。

日照与建筑布置方式有很大关系，通常有行列式、周边式（建筑物沿街道周边布置）、混合式和自由式。即使这样的布置，仍存在着一幢楼房与另一幢紧挨着建的问题。张德沛进行过研究，在平行布置的一南一北两幢住宅，若其间距小，且建筑物又长，则后排住宅低层大部分房子冬至前后全天都见不到阳光，如图 3.2.7。如在图的 A、B 处有 15 m 宽的间距，就会大为改观，如图 3.2.8。由图可见，后排建筑前立面上 90 m 宽的地区均可得到日照。即在 35 m 宽度范围内，在冬至日可照射 1 h，另外，后院本来全天见不到阳光的庭院，约有 1600 m^2 以上可以照到阳光。

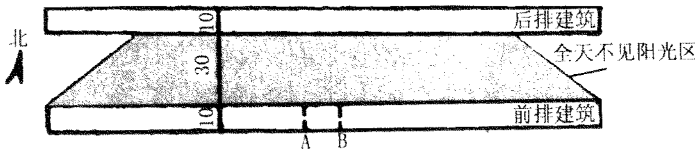


图 3.2.7　南北平行两幢住宅日照示意

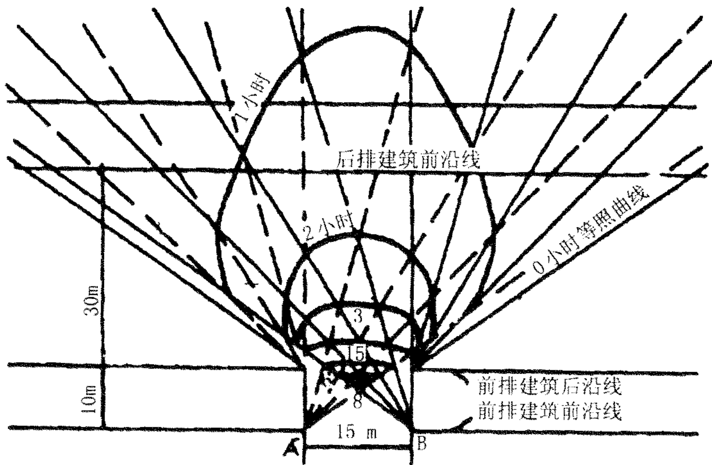


图 3.2.8　两幢楼间日照轨迹图

第三节　建筑风、雪荷载的计算及分布

一、建筑风荷载

建筑气候中最重要的是建筑物承受的风压。风的资料可以用各种方法来表示，每一种表示方法都对解决某种特殊问题极为有用。但在建筑结构设计方面，最大风速值是有用的，可以用来计算风对建筑结构的承受压力。

风压是建筑结构设计中基本的设计依据，故风压数值的大小，关系到各种建筑物、构筑物、架空线路、广播塔、电视塔、微波塔以及各种桥梁等工程的经济性、适用性和安全性。因此，风压值的确定有着非常重要的现实意义。

风荷载是风对建筑物的动力作用，它表示对建筑结构各部分或整体建筑物造成瞬间机械损坏的危险程度。

美国华盛顿州塔科马(Takoma)峡桥，是世界上最长的悬桥之一，桥长 1662m，由于设计不当，于 1940 年因受风荷载的动力作用被完全摧毁。

英国渡桥(Ferrybridge)电厂 8 座巨型冷却塔，塔高 114.3m，分两排，在 1965 年 11月 1 日的一次大风中后排的 3 座冷却塔被大风吹毁，也是由于设计风压比规定的偏小所造成的。

我国 1980 年在河北陡蓟通线的 22×10 kV 双回路输电线路，在大风中倒塔 8 基，倒杆 76 基，也是由于风压取值不当造成的。

建筑物在流动的风场中，在迎风面受到一定的压力，并且建筑物是非线型的，在背风面形成一定的旋涡而产生吸力。此外，还有建筑物表面与空气流动的摩擦力。不过，它的数值一般很小。这些压力和吸力在整个建筑物表面并不是均匀分布的，它随着建筑物体型，面积和高度不同，风速、风向及湍流结构的变化而不停地改变着。由于建筑物在风中的运动，一定程度上也引起压力分布变化。

远在 17 世纪，加利略和牛顿都曾研究过风压，但到 19 世纪末，设计上才重视确定风压。主要是由于 1879 年特(Tay)桥事故，促使桥梁工程加大风压到 547 kPa。其后英国贝克(Baker)研究了风力板的反应，将设计风压降为 274 kPa。到了近几十年，将数理统计应用于设计风速上，风压的取值才比较稳定。

(一)风荷载

作用在建筑物上风压称风荷载。因为风压有稳定风压(建筑上称空气静力作用)和脉动风压(建筑上称空气动力作用)两种。所谓稳定风压，就是在给定的时间间隔内，把风对建筑物的作用力的速度、方向以及其他物理量都看作不随时间而改变的量。脉动风压，是由于空气紊流作用造成的一种不规则运动，随时间而改变的，故对建筑物具有一种随机的作用力，如图 3.3.1。图中横线为平均风速，即 A-A′稳定风压(静力)，沿 A-A′线上下之波动部分为脉动风

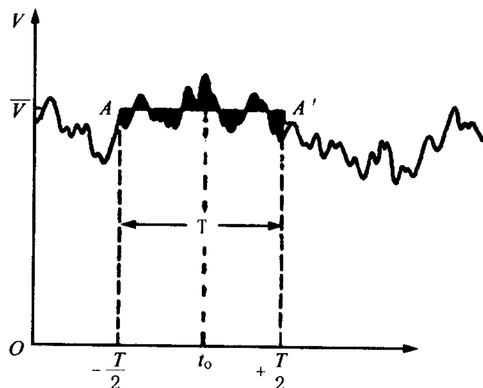


图 3.3.1　风速随时间变化曲线

速，即脉动风压(动力)。

在一般房屋设计中只考虑稳定风压，只有在设计刚度较小建筑物如高层建筑物和柔性构筑物，如电视塔、广播塔、微波塔、冷却塔、桅杆、输电塔、炼油塔等时，才必须考虑脉动风压(即风振)。因此，风荷载是基本风压(W_0)、风载体型系数(μ_s)、风压高度变化系数(μ_z)、风振系数(β)的乘积。即

$$W = W_0\mu_s\mu_z\beta. \tag{3.3.1}$$

(二)基本风压的确定

我国地域辽阔，形成大风的天气气候背景不同，所以各地承受的风荷载大小不相同，确定基本风压的目的，是要根据当地的风速资料确定各地合理的风压值。

风压是在最大风速时，垂直于风向的平面上所受的压力，单位是 kPa。

风速与风压的关系，可以从伯努利方程导出

$$W_0 = 1/2\rho v^2 \tag{3.3.2}$$

式中，W_0 为风压，ρ 为空气密度(kg/m^3)，v 为风速(m/s)，空气密度 ρ，它等于 r/g，r 为空气重力密度(容重)，g 为重力加速度。

在标准大气下，气压为 1 013 hPa，温度为 15 ℃时的干空气重度r=0.01225 kPa，纬度 45°处的重力加速度 g=9.8 m/s²，将式(3.3.2)中的 ρ 变为 r/g，则得到

$$W_0 = \frac{rv^2}{2g} = \frac{0.01225v^2}{2\times 9.8} = \frac{v^2}{1600}. \tag{3.3.3}$$

此式为从风速计算风压的标准通用公式。

事实上，式(3.3.3)是在标准大气情况下求得的。由于纬度不同海拔高度不同，空气重量与重力加速度也随之而变化，所以式(3.3.3)中的风压系数 $r/2g$ 也是一个变数，如表 3.3.1。由表可以看出各地$r/2g$不相同，东南沿海为 1/1 700 左右，内陆海拔在 300 m 以下为 1/1 600 左右，海拔在1 000 m左右约为 1/1 900，海拔在3 000～4 500 m为 1/2 200～1/2 600。因而，在计算风压时，$\frac{r}{2g}$这个系数的取值不能忽视。

表 3.3.1 风压系数$\left(\frac{\rho}{2}=\frac{r}{2g}\right)$之值

地区	地点	海拔高度(m)	r/2g	地区	地点	海拔高度(m)	r/2g
东南沿海	青岛	77.0	1/1710	内陆	承德	375.2	1/1650
	南京	61.5	1/1690		西安	416.0	1/1680
	上海	5.0	1/1740		成都	505.9	1/1670
	杭州	7.2	1/1740		伊宁	664.0	1/1750
	温州	6.0	1/1750		张家口	712.3	1/1770
	福州	88.4	1/1770		遵义	843.9	1/1820
	永安	208.3	1/1780		乌鲁木齐	850.5	1/1800
	广州	6.3	1/1740		贵阳	1017.2	1/1900
	韶关	68.7	1/1760		安顺	1392.9	1/1930
	海口	17.6	1/1740		酒泉	1478.2	1/1890

（续表）

地区	地点	海拔高度(m)	r/2g	地区	地点	海拔高度(m)	r/2g
	柳州	97.6	1/1750		毕定	1510.6	1/1950
	南宁	123.2	1/1750		昆明	1891.3	1/2040
	天津	16.0	1/1670		大理	1990.5	1/2070
	汉口	22.8	1/1610		华山	2064.9	1/2070
内陆	徐州	34.3	1/1660	内陆	五台山	2895.8	1/2140
	沈阳	41.6	1/1640		茶卡	3087.6	1/2250
	北京	52.3	1/1620		昌都	3176.4 *	1/2550
	济南	55.1	1/1610		拉萨	3658.0	1/2600
	哈尔滨	145.1	1/1630		日喀则	3800.0 *	1/2650
	萍乡	167.1	1/1630		五道梁	4612.2 *	1/2620
	长春	215.7	1/1630				

* 非实测高度

由上述风速与风压关系得知，风压与风速的平方成正比。因此，风速选取显得特别重要，各国选取的也不相同，有取瞬时风速的，有取 2 min 平均风速，有取 10 min 平均风速和 1 h 平均风速等。无论取那种风速还有一个概率问题，取 20 年一遇、30 年一遇、50 年一遇，还是 100 年一遇。

我国基本风压取值标准是，在比较空旷平坦地面上，离地 10 m 高，概率统计所得的 50 年一遇 10 min 平均最大风速。

我国取的是时距（记录风速时间的长度）10 min 平均风速，主要是考虑到风速功率谱图，如图 3.3.2，该图是范德霍文（vander Hiven）在纽约州布鲁克海文（Brookhaven）100 m 高度处测定的。由图可见，功率谱明显地分为两个区段，一个是高频区段，它主要是由于具有湍流性质的脉动风所形成，也称小尺度气候范围或阵风区，其峰值周期约为 1～2 min；另一个是低频区段，它是受大尺度气候的影响，频率较低，其峰值周期约为 12 h 到 4 d，它反映了大气候风的变化规律。

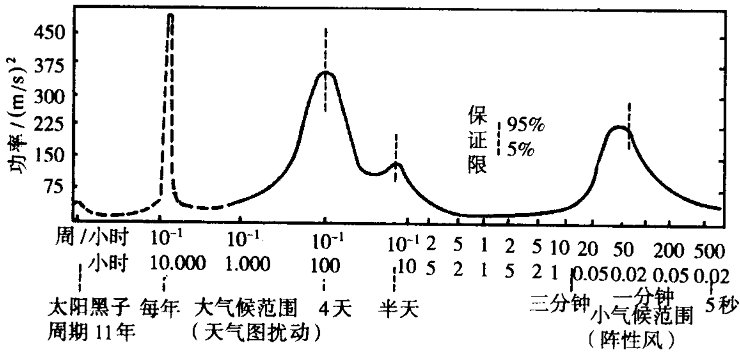


图 3.3.2 地面水平风速在广泛频度下的频谱

在高频和低频区段之间，有一个周期在 5 min 到 5 h 之间，表明在这个区域内，风速波动的能量很低，风速值比较稳定。所以时距选 5、10 min、1 h 等都是合理的，我国风压标准选用的

是 10 min 平均风速。选取 10 min 平均风速，还有一个原因，我国气象站自记观测记录都是 10 min 平均风速，这样计算时比较方便。

1. 观测次数和时距换算

在我国 1970 年以前，基本上是 1 天 4 次观测 2 min 平均风速。用这些资料计算风压，必须把 4 次观测换算为自记，再将2 min换算为 10 min。在实践的基础上，将这两步并为一步换算误差反而小些。

表 3.3.2 给出各地换算关系式。表中 Y 为自记 10 min 平均风速，X 为定时 1 天 4 次2 min 平均风速。

表 3.3.2 自记 10 分钟与 4 次定时 2 分钟关系式

地区	回归方程式	应用范围
华北	$Y=0.882X+7.82$	华北
东北	$Y=0.97X+3.94$	东北
西北	$Y=1.004X+1.57$	西北和西藏
青海 *	$Y=0.845X+5.21$	
云贵	$Y=0.751X+6.17$	云南、贵州
四川 *	$Y=1.24X$	
湖北	$Y=0.732X+7.0$	湖北、江西
湖南	$Y=0.68X+9.54$	
福建	$Y=1.00X+3.11$	
广东	$Y=0.91X+4.96$	广东、福建、台湾
广西	$Y=0.793X+4.71$	
江苏	$Y=0.78X+8.41$	上海、江苏、浙江、安徽
山东	$Y=0.86X+5.14$	山东
渤海面	$Y=0.93X+0.35$	海面

气象站的观测中还有瞬时风速的记录。为了利用瞬时风速资料，利用我国约有 10 多个站的达因风速自记记录，读出瞬时与 1、2、5、10 min 各种间的关系，如表 3.3.3。

表 3.3.3 瞬时与各种风速时距间关系

序号	不同风速时距		回归方程式	地区
1	瞬时与 1 min 平均风速		$Y=0.893X-0.82$	
2	瞬时与 2 min 平均风速		$Y=0.79X-0.45$	
3	瞬进与 5 min 平均风速		$Y=0.71X+0.10$	
4	瞬时与 10 min 平均风速	陆地	$Y=0.65X+0.50$	京、津、塘沽
			$Y=0.70X-1.66$	云贵高原
			$Y=0.73X-2.80$	广东
			$Y=0.66X+0.80$	四川
			$Y=0.63X+1.00$	福建
			$Y=0.69X-1.38$	上海
			$Y=0.70X-0.10$	浙江
		海面	$Y=0.75X+1.00$	渤海海面
5	2 min 与 10 min 平均风速		$Y=0.88X+0.80$	

注：序号 1、2、3、4 中分别为 1、2、5、10 min 平均风速，X 为瞬时风速；序号 5 中 Y 为 10 min 平均风速，X 为 2 min 平均风速。

2. 风压概率计算

风压标准要求一定概率下的最大风速，即一定重现期的年最大风速。所谓重现期，指大于某数值的最大风速平均多少年可能遇到 1 次。如 50 年一遇，它的重现期为 50 年。

重现期不是周期，如在 1959 年出现了百年一遇的大风，这并不意味着下一次将在 2059 年又出现。不过，使用重现期的概念是体现建筑结构的安全度。换句话说，建筑结构的安全度可用设计时采用的重现期长短来体现。重现期为 50 a 的风速，每 1 年出现超过这个风速的概率是 1/50(即 2%)，不超过这个风速的概率为 49/50=98%。重现期为 100 a 的风速，每年再现的概率为1/100=1%，每年不超过这个风速概率是 99/100=99%。所以，重现期长比重现期短更安全。

风速极值的重复发生，可以利用极值理论进行计算。每年最大风速 X_{max}，它是一个随机变量，不同年代出现的最大风速值不同。以 $F(x)$代表"X 小于 X_{max}"的概率，称为 X 分布函数，即

$$F(x) = P\{X < X_{max}\}.$$

研究最大风速的问题，首先确定 $F(x)$的线型。关于线型的确定，国内外进行了很多工作。归纳起来主要有两方面，一方面从统计理论上确定年最大风速应服从的概率线型，然后从实际资料确定其参数，如极值分布线型；另一方面，从经验概率上确定年最大风速分布线型，然后从实际资料确定其参数，如皮尔逊线型族。目前国内外，在计算风压时，基本上采用极值分布线型。

从统计学理论导出随机变量的极值的概率分布称极值分布。以风速为例说明极值分布的意义。

从每年的风速记录中挑出每年的最大风速，许多个年最大风速必具有一概率分布，属于极大值的分布。

极值分布在气候正常时用的是 I 型极值分布(又称双指数分布)。

极值 I 型

原始分布属指数型，其极大值 X 的分布应属 I 型分布，其分布函数

$$F(X) = e^{-\alpha(x-\mu)} \tag{3.3.4}$$

式中，α 为尺度参数，与均方差成反比，μ 为位置参数，反映频率分布集中在数轴上的位置，它与平均值 $\bar{x}$ 和均方差的关系是：

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{\pi}{\sqrt{6}}\dfrac{1}{\sigma}, \\ \mu = \bar{x} - 0.5772\dfrac{\sqrt{6}}{\pi}, \end{cases} \tag{3.3.5}$$

根据极值 I 型求出的风速理论分配曲线，是否能真正代表实际风速出现的规律，可以通过适合度检验来判定。

检验风速的理论分布与经验分布的适合度，一般采用柯尔莫哥洛夫(A. H. Кормогоров)检验和 ω^2 检验。经过对极值 I 型检验，拟合优良，因此我国荷载规范对风速统一采用极值 I 型进行计算。

3. 我国风压分布

按极值 I 型，计算全国 660 余站的 10、30、50 和 100 年一遇自记10 min平均最大风速，代入风压公式(3.3.3)，即得到全国不同重现期风压。由于国家标准风压是 50 年一遇，故以 50 年一遇为基础，推求 30 年和 100 年一遇的风压比值，分别为 0.91 和 1.1。若需要 30 年或 100 年

一遇，乘以比值即可得到各自的重现期。

我国标准风压分布图 3.3.3，有如下几个特点：

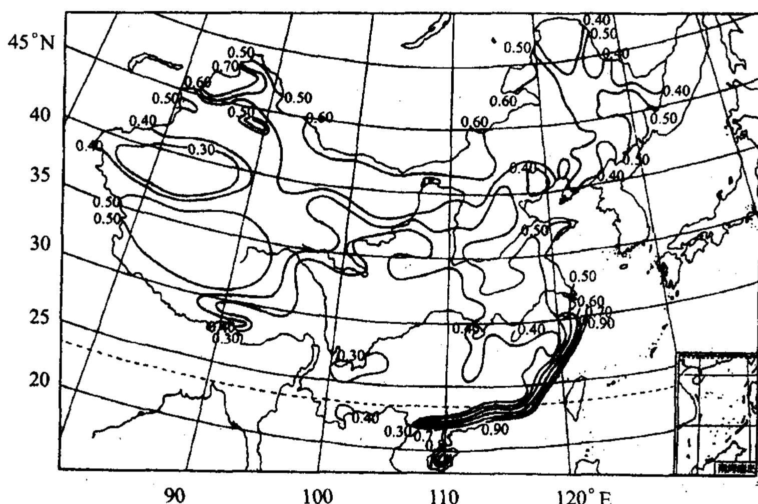


图 3.3.3　全国基本风压分布图(单位：kPa)

(1)东南沿海为我国大陆上最大风压，0.9 kPa，这一地区主要是由于台风造成的大风。在厦门 1959 年 8 月 23 日利用达因风速仪实际观测到瞬时风速为 60 m/s，10 min 平均 38.0 m/s。在汕头 1969 年 7 月 28 日也用同样的仪器观测到瞬时风速为52.1 m/s，10 min 平均为34.0 m/s等如表 3.3.4。

表 3.3.4　我国出现极大时的瞬时风速与 10 min 平均风速及其比值与天气系统

地点	时间(年·月·日)	瞬时风速(m/s)	10 min 平均风速(m/s)	比值	天气系统
台东	1959.8.29	70～75			台风
花莲	1962.8.5	65.0			台风
香港	1962.9.1	72.1	40.2	1.79	台风
珠海	1973.9.14	68.9	48.0	1.44	台风
厦门	1959.8.23	60.0	38.0	1.58	台风
基隆	1996.7.31	65.0	53	1.33	台风
瑞安	1994.8.21	50.4			台风
汕头	1969.7.28	52.1	34.0	1.53	台风
汕尾	1979.8.2	60.4	45.0	1.34	台风
石浦	1961.10.3	52.3			台风
西沙	1981.7.3		45		台风
福州	1954.8.28		33.4		台风
广州	1964	35.0	22.0	1.59	台风
象山	1956.8.1	60～65			台风
上海	1949.7.25	38.9	28.4	1.37	台风

台风一旦登陆强度很快减弱，风速也锐减，我们统计了各次强台风登陆后，在离开海岸不同距离内与其所造成的最大风速的关系，并将各距离上的最大风速，以海岸线最大风速为单位，换算为百分率，如图 3.3.4，由图可见，风速在靠近海岸处削弱特别急剧，内陆则较缓。

若以台风登陆时在海岸上风速为100%，那么在离海岸50 km处，台风中心附近的最大风速为海岸登陆时的68%(风压为46%)左右，到100 km的地方，差不多仅为海岸风速55%(风压为27%)，由100 km再向内陆风速削弱变缓。这种削弱，由于东南沿海向内陆排列着几条与海岸平行的山脉，是使风速减弱的主要原因。

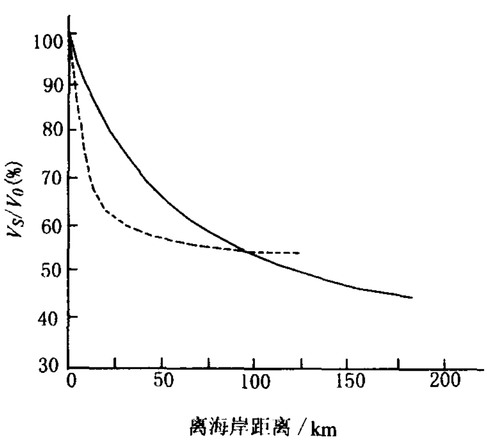


图 3.3.4 台风登陆风速削弱百分比
实线：内陆；虚线：海岸旁

在全国风压分布图上，可以看出，风压等值线平行于海岸线，而且沿海风压梯度为全国最大，大致在距海岸100 km以外的内陆风压由0.9 kPa减到0.3 kPa，不但不是全国高风压区，反而是全国最小风压区之一。

(2)海岛上风压是全国最大的。台湾由于资料不全，尚无法计算风压，但从表3.3.4中可以看出，我国出现最大风速是在台湾。在台东1959年8月29日曾观测到台风风速70～75 m/s的瞬时风速，是我国有记录以来最大的一次。香港、海南也都观测到瞬时最大风速在70 m/s左右。如香港1962年9月1日观测到瞬时风速72.1 m/s，琼海1973年9月14日68.9 m/s等。由此估计，台湾东部风压可达1.2 kPa以上，香港、海南东部风压也可达1.0 kPa以上。

(3)三北(东北、华北、西北)地区的北部为我国陆地上风压次大区，为0.6 kPa或以上。风压由北向南递减。这一地区的大风主要是强冷空气过境造成的。每当冷空气南下，在这一带均要造成大风，尤其是当强大寒潮南下时，往往造成年最大风速，尤其是在一些山口地区。如新疆的阿拉山口，1977年10月1日10 min平均风速46 m/s；1977年4月2日，瞬时风速达55 m/s；内蒙古林西1963年4月16日最大风速42 m/s等。

(4)青藏高原海拔高度高，风速较大，应为风压较大区，但由于海拔高，空气密度小，同样是30.6 m/s大风，在平原上风压为0.59 kPa，而在4 000 m则为0.40 kPa，仅为平原的68%。风压随高度变化如表3.3.5，所以青藏高原风压低于三北地区。然而若在地形开阔，山脉走向与高空西风一致或在高空西风的迎风一侧，风速较大，风压仍可达0.4至0.6kPa。

表 3.3.5 风压随海拔高度变化

海拔高度(m) \ 风压值 \ 风级(m/s)	8级 (19.0 m/s)	9级 (22.6 m/s)	10级 (26.5 m/s)	11级 (30.6 m/s)	12级 (32.6 m/s以上)	比值
0	0.23	0.32	0.44	0.59	0.66	1.00
1 000	0.21	0.29	0.40	0.54	0.61	0.92
2 000	0.19	0.27	0.37	0.49	0.56	0.84
3 000	0.17	0.24	0.33	0.44	0.50	0.76
4 000	0.15	0.22	0.30	0.40	0.45	0.68
5 000	0.14	0.20	0.27	0.36	0.41	0.61
6 000	0.12	0.18	0.24	0.32	0.36	0.55
7 000	0.11	0.16	0.22	0.29	0.33	0.49
8 000	0.10	0.14	0.19	0.25	0.29	0.44

(5)长江、黄河下游风压在 0.3～0.5 kPa 之间，由沿海向内陆递减，沿海一般在 0.5 kPa 左右，山东半岛的东部和北部沿海可达 0.6 kPa。等值线稀疏，各地间风压差值很小。这一地区的大风除强寒潮造成大风外，夏季的雷暴大风或飑线大风也是造成这一地区最大风速的天气系统。如上海 1967 年 3 月 26 日瞬时风速34.7 m/s是飑线大风，南京 1974 年 6 月 17 日瞬时 38.8 m/s，10 min平均 25 m/s，也是飑线大风。

由于地形的影响，在长江洞庭湖、鄱阳湖风压较大，为一个闭合圈，风压在 0.4 kPa 以上。

(6)我国风压最小的地区在四川、贵州，湘西、鄂西以及南岭山地区，仅在 0.3 kPa 以下。这一地区冬季冷空气很难入侵。夏季台风又难以到达，所以年最大风速为全国最小地区。

建筑结构规范中规定，基本风压取值不得小于 0.3 kPa。这大概也是以我国最小风压为依据的。

为了加大高层建筑的安全，所以在规范中还规定了，对风荷载比较敏感的高层建筑物和高耸构筑物，其风压可在 50 年一遇的基础上加大 10%；对于特别重要和特殊要求的高层建筑物和高耸构筑物，其风压可提高 20%。

(三)风压随高度变化

一般谈到的风压是指离地面10 m高度处的风压。但高层建筑物或高耸构筑物可达 100 m 以上，有的甚至可达 500 m 以上。如美国纽约原世界贸易中心双塔高 411 m；美国纽约的曼哈顿建造三角形大楼 150 层高 509 m，洛杉矶和平铁塔高 610 m。我国高度超百米的大厦已有几十座，其中最高的是上海浦东新区陆家嘴金融贸易中心的金贸大厅，总建筑面积 $28.7\times10^4 m^2$，大厅主体建筑地下 3 层，地上 88 层，高度达 420.5 m，北京的京广中心，地上 52 层高 209 m，广东国际大厦有 200.2 m；北京电视塔高度 405 m。由此可见，仅 10 m 高度处的风压是不能满足需要的，所以必须将10 m高度处的风压换算到所需要的高度。

大气边界层以下，从摩擦对大气运动影响的程度着眼，可以把大气分为大气边界层和自由大气两个层次。在中高纬度地区，摩擦层内风速主要取决于水平气压梯度力、水平地转偏向力和摩擦力的大小，而在摩擦层中，气压随高度不变时，风速随高度的变化主要是由于摩擦力随高度的变化而引起的。一般地，摩擦力随高度的增加而减小，故风速随高度而增加，到了风单纯受气压梯度的影响时，称为梯度风，此处风向与等压线平行，将风向最先转变成梯度风的高度，作为大气边界层的高度。在此高度以下称为摩擦层。

摩擦层内风速垂直变化的快慢与地表粗糙度有极密切的关系。加拿大的达文波特对 19 种不同地面的粗糙度，即从开阔的水面到市区都测定了地面粗糙度，并绘制了风速随高度的分布图。他参照了有关资料作出海洋、农村和城市 3 种典型的风速随高度分布图，如图 3.3.5。由图可以看出，接近地表的气流，由于摩擦作用而流速减慢。地面愈粗糙则梯度风的高度愈高，开阔海洋上比城市在较低的高度上达到梯度风。从图上还可以看出，在离地 30 m 高度，城市的风速为海洋上风速的 1/4。

从试验和理论计算都证明，大气边界层高度平均为 1 500 m。

由于边界层顶附近风速随高度变化很小，从 500 m 以上高度开始可以考虑其为常数，误差在 5%～10%之间。

根据国内外的研究，在边界层以下，风速随高度的变化规律呈指数函数

$$\frac{v_n}{v_1}=\left(\frac{z_n}{z_1}\right)^{\alpha}, \qquad (3.3.7)$$

式中，v_n 为 z_n 高度处的风速，v_1 为参考高度 z_1 高度处的风速，α 为指数。

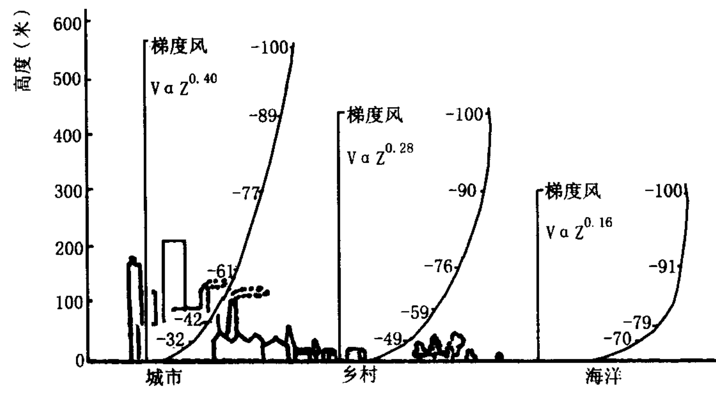


图 3.3.5 不同地面粗糙度的风速廓线

α 值与地面粗糙度有关，不同的地面粗糙度 α 值就不同。α 值的大小反映了风速随高度增加的快慢。α 值大表示风速随高度增加的快，即风速梯度大；α 值小表示风速随高度增加的慢，即风速梯度小。粗糙的表面比光滑的表面易形成湍流，所以近地层风速随高度变化小，即 α 值较大。

我国建筑结构荷载规范，将 α 值分为 4 类。A 类 $\alpha=0.12$，指的是近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；B 类 $\alpha=0.16$，指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；C 类$\alpha=0.22$，指有密集建筑群的城市市区；D 类 $\alpha=0.30$，指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。根据这四类地面粗糙度分别计算得出风压高度变化系数 μ_z 表(3.3.6)。

表 3.3.6 风压高度变化系数 μ_z

离地面或海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38	1.00	0.74	0.62
15	1.52—	1.14	0.74	0.62
20	1.63	1.25	0.84	0.62
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02
80	2.27	1.95	1.54	1.11
90	2.34	2.02	1.62	1.19
100	2.40	2.09	1.70	1.27
150	2.64	2.38	2.03	1.61
200	2.83	2.61	2.30	1.92
250	2.99	2.80	2.54	2.19
300	3.12	2.97	2.75	2.45
350	3.12	3.12	2.94	2.68
400	3.12	3.12	3.12	2.91
≥450	3.12	3.12	3.12	3.12

根据地面粗糙度指数及梯度风高度，即可得出风压高度变化系数如下：

$$
\begin{cases}
\mu_Z^A = 1.397\left(\dfrac{z}{10}\right)^{0.24} \\
\mu_Z^B = 1.000\left(\dfrac{z}{10}\right)^{0.32} \\
\mu_Z^C = 0.616\left(\dfrac{z}{10}\right)^{0.44} \\
\mu_Z^D = 0.318\left(\dfrac{z}{10}\right)^{0.60}
\end{cases} \tag{3.3.8}
$$

在确定城区的地面粗糙度类别时,若无 α 的实测资料,可按上述原则近似确定。

(四)风载体型系数

是指风作用在建筑物表面上所引起的实际压力或吸力与来流风的速度压的比值。它反映建筑物表面在稳定风压作用下的静态压力的分布规律,主要与建筑物的体型尺度有关。

要了解各种建筑物表面上的压力或吸力的大小及其分布情况,主要采取相似原理,在边界层风洞内通过试验资料分析所确定。

根据大量的风洞试验,求出各种模型的体形系数,从而定出有关风载体型系数中的一些规律性。如迎风墙面、墙高与墙长之比越大,风体型系数大;顺风山墙和背风墙面,当房屋宽度与高度之比越大,风载体形系数越小。又如空旷地面封闭式建筑,迎风垂直面风载体型系数为正,背风垂直面为负,顺风侧立面(山墙)为负等等。

我国建筑结构荷载规范中列出了 38 项不同类型的建筑物和各类结构体型及其风载体型系数。

在建筑群尤其是高层建筑群,房屋间距离较近时,由于涡流的影响,房屋某些部位的局部风压会显著增大,若是比较重要的高层建筑,还要专门在风洞进行周围环境影响的风洞试验。

(五)风振系数

建筑物并非绝对刚性,在风力的作用下,常会产生一定的振动。

脉动风速是由无数个不同频率的脉动因子的叠加而形成的。这种脉动因子的大小和相互之间的比例,在时间较短的情况下是无规律的,但时间较长,次数较多,就可发现有明显的规律性,这种规律属于随机规律或者统计规律。在数学上通常用相关函数来描述风压的平稳随机特性。

结构物根据其自身的刚度,也即其自振频率的不同,对脉动风产生不同的响应。图 3.3.6 给出不同结构的自振频率范围与脉动风速和地震加速度功率谱密度的比较。

由图可见,一般房屋由于整体刚度大,受脉动风速的影响较小,所以规范规定风振问题不是所有建筑物都要考虑的。对于高度低于 30 m 或高宽比小于 1.5 的房屋结构,及自振周期小于 0.25 s 的塔架、桅杆和烟囱等高耸结构,一般允许不考虑风振影响。而对高层建筑及柔性结构就不能忽略风载脉动的影响。

Davenport 曾对美国、英国、加拿大、澳大利亚等国不同地区,不同高度收集了 90 多次强风记录,得出水平脉动风速的功率谱密度,并提出了经验公式,由于该公式简单,在国际上得到广泛的承认和利用。

风振系数的确定,在脉动风速作用下的结构响应,只有通过结构的随机振动理论来求解。

风振系数是仅指顺风向振动时的风振系数,因为,风速作为随机过程,在空间沿着三个方

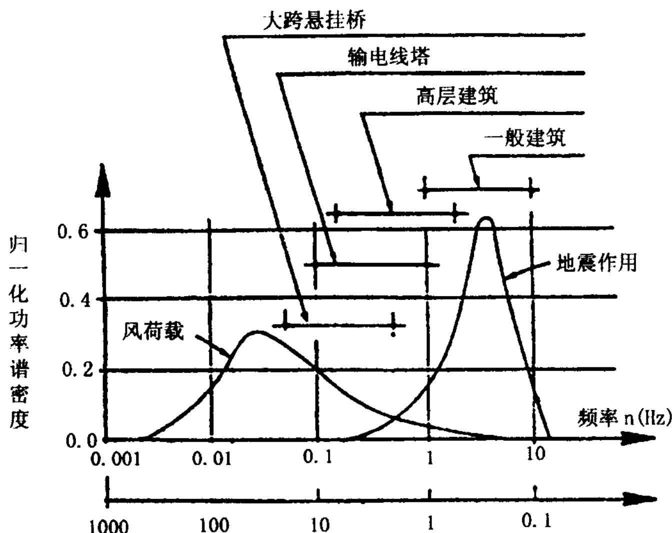


图 3.3.6　不同结构自振频率与脉动风速功率谱密度比较

向都随着时间发生变化，因此脉动风速是三维随机过程，但主要的脉动是发生在顺风向，也就是气流的平均方向。由于风速的随机性，风振系数应根据随机振动理论导出。

对于外形和重量沿高度无变化的等截面结构：如只考虑第一振型影响，可以导出沿高度 Z 处的风振系数 β_z。

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi v \varphi_z}{\mu_z}, \tag{3.3.9}$$

式中，ξ 为脉动增大系数，v 为脉动影响系数，φ_z 为振型系数，μ_Z 风压高度变化系数。

二、建筑雪荷载

雪荷载是建筑物的垂直荷载。也是房屋屋面结构的主要荷载之一。在我国寒冷地区及南方积雪大的地区，因雪荷载导致屋面结构破坏甚至整个结构破坏的事例常有发生。尤其是一些大跨度结构及轻型结构，对雪荷载更为敏感。是否合理确定雪荷载的大小及其在屋面的分布，将直接影响这类建筑结构的安全性、适用性和经济性。

雪荷载的标准值(S_K)是作用在屋面的水平投影面上雪的重量

$$S_K = \mu_r S_o \tag{3.3.10}$$

式中，μ_r 为屋面积雪分布系数，S_o 为基本雪压(kN/m^2)。

(一)基本雪压

雪压是单位水平面积上所承受的积雪重量(即积雪自重)。

基本雪压系以当地一般空旷平坦地面上概率计算所得 50 年一遇最大积雪的自重确定。即积雪深度乘以积雪密度。

1. 积雪深度

雪深是从积雪表面到地面的垂直深度。以 cm 为单位。下雪后，当气温接近 0 ℃或低于 0 ℃，就可能在地面上累积起来。若台站四周积雪面积过半，便为积雪日，但积雪深度平均不足 0.5 cm时，则视为无积雪。

我国最大雪深主要在三北北部和长江下游，如表 3.3.7。由表可见，最大雪深可达 100 cm。长江下游也可达 50 cm 以上。

表 3.3.7　全国最大积雪深度超过 50 cm 地点(不包高山站)

省(区)名	地　点	雪深(cm)
新疆	乌鲁木齐小渠子	65
	阿勒泰	73
	霍城霍尔果斯	72
	富蕴	89
	塔城	75
	察布查尔	65
	精河	81
	青河	81
	伊宁	89
	裕民	57
	新源	67
	昭苏	63
黑龙江	漠河	68
	孙吴	53
	绥芬河	51
	通河	55
	鸡西	60
	饶河	68
吉林	延吉	58
	桦甸	54
内蒙古	根河	50
	林西	100
	小二沟	50
	林东	100
	兴安	62
	图里河	50
	大局子	56
	王盖庙	80
安徽	正阳关	52
	寿县	52
江苏	南京	51
浙江	江山	54
	东阳	55
	宁海	50
湖北	绿葱坡	50
云南	德钦	70

2. 积雪密度

我国 1980 年以后才规定若雪深已达 5 cm 或以上时，在雪深观测后，就在观测雪深的地点附近进行雪压观测。雪深不足 5 cm 时，不观测雪压。所以在计算基本雪压时，不需要积雪深度乘以积雪密度，可以直接利用气象站的雪压资料计算。

然而，在 1980 年以前气象站不是直接观测雪压，而是雪深和积雪密度分开两项观测，况且大部分台站只观测雪深，不观测积雪密度，只有少数台站同时观测积雪密度。这就给计算雪压带来了很多麻烦。而各地积雪密度又有较大差异。因为积雪密度是一个随时间及空间变化的随机变量，它随着积雪厚度、积雪时间长短、气温的高低等因素的变化而变化。

一般新雪密度小，旧雪密度大，湿雪比干雪的密度大。雪深大时，往往密度较小。根据我国实测的积雪密度资料将全国划分为 4 个地区。东北地区和新疆地区，降雪机会多、温度低、积雪时间长，因而积雪密度较大，一般为 140～150 kg/m³；华北、西北和西藏地区，气候干燥、降雪量小、积雪密度小，一般为120～130 kg/m³。秦岭淮河一线以南南岭以北地区，空气湿润、气温较高、多为湿雪。因而积雪密度最大，一般为 150 kg/m³，沿海地区还要大，如浙江可达200 kg/m³。

按这 4 个地区，将 1980 年以前只有雪深观测的台站，统一换算成雪压，这样 1980 年前后就归一化，然后用概率计算50 年一遇最大雪压。

3. 基本雪压概率计算

各个地区出现的年最大雪压是一个随机变量。建筑结构设计所要考虑的是结构使用期限内可能出现的雪压最大值，也就是50 年一遇的值。推算这个值，从每年的记录中，挑出每年的最大雪压值(若只有雪深可换算为雪压)，许多个年最大雪压，必具有一概率分布，属于极大值的分布。

根据国内外研究，雪压年极值分布服从于极值 I 型分布。在风压计算中已介绍了这种分布。按极值 I 型分布可计算出50 年一遇最大雪压。

4. 基本雪压分布

将全国 660 余站的雪压统一计算到 50 年一遇最大雪压，绘出我国基本雪压分布图，如图 3.3.7。

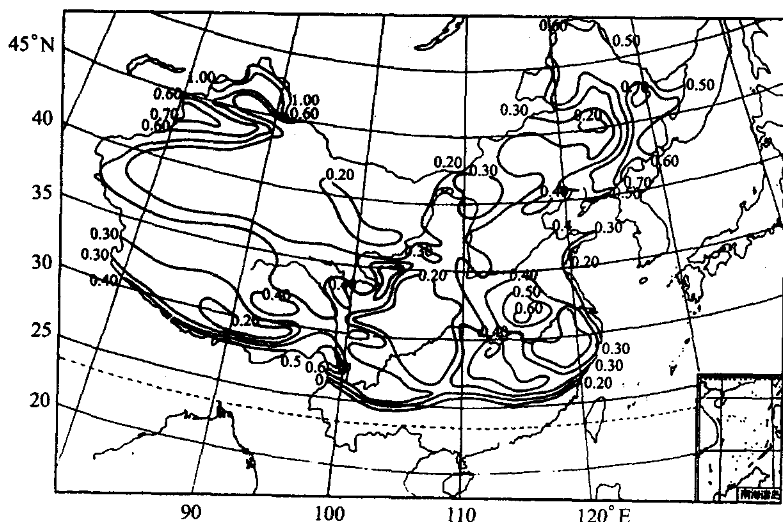


图 3.3.7 全国基本雪压分布图(单位：kN/m²)

由图可以有如下几个特点：

(1)新疆北部是我国的最大雪压区。该区由于冬季受北冰洋来的冷湿气流影响，雪量丰富，且阿尔泰山、天山等山脉对气流有阻滞和抬升作用，更利于降雪。加之气温低，积雪时间长，旧雪复以新雪，使之雪压特大。阿尔泰山区域雪压在 1.0 kPa 以上。

(2)东北和内蒙古东北部雪压次大区。这一地区纬度较高，有着漫长而寒冷的冬季，气旋活动又很频繁，因靠近海洋湿度也大，所以降雪日为我国东部地区之首。吉林天池降雪 142 d，是我国降雪日数最多的地方。大兴安岭根河以北，不但雪天多，雪量也丰富，而且气温低、湿度大、蒸发较慢、积雪期长、雪压在 0.6 kPa 以上。长白山南坡受海洋影响，降雪多，雪压在 0.7 kPa 左右。三江平原东部因受日本海、鄂霍次克海潮湿气流的影响，降雪量也大，雪压也可达 0.7 kPa。

(3)长江中下游及淮河流域是我国第三个雪压高值区。该区冬季积雪不很稳定，有些年份可一冬无积雪，有些年份积雪很深，如南京从 1952～1995 年在 44 a 中有 7 a 冬季无积雪，然而在 1955 年元旦曾积雪 51 cm，1984 年也积雪 36 cm。安徽合肥、寿县正阳关，浙江的金华、东阳，江西乐平、德兴、安义等也有类似的情况 ，有些年份无雪，有些年份降雪在 40～50 cm。但积雪日数较少，一般最多 10 d 左右。这一地区雪压在 0.5 kPa，大别山北麓的霍山可达 0.6 kPa 以上。

(4)川西、滇北山区的雪压也较高，雪压在 0.4～0.6 kPa 之间。因为该区在冬季仍有水汽较多的西南气流影响，加之海拔高，故温低湿大，降雪较多而不易融化。但该区的河谷内，由于落差大、海拔较低和气流下沉增温的作用，积雪就很少了。

(5)华北及西北大部分地区，雪压较小，这一地区虽冬季气温低，但水汽不足，降雪量较少。雪压从东向西减少，东部一般在0.2～0.4 kPa之间，西部的西北及内蒙古西部干旱地区，雪压更小在 0.2 kPa 以下，有些地方还在 0.1 kPa 以下。

(6)青藏高原海拔高度相差极为悬殊，所以降水的性质也相应的发生很大的变化。在 4 000 m 以上的地区，一年四季均会产生降雪的现象。这里除了一些永久性高山积雪外，在喜马拉雅山、巴颜喀拉山和祁连山积雪期较长在 50～100 d，但藏南谷地还不到10 d。

冬季由于受不到孟加拉湾的暖湿气流的影响，降雪量较少，且冬、春多大风，积雪常被吹掉，所以积雪深度不太厚，一般不到20 cm，雪压在 20～30 hPa。

(7)南岭、武夷山以及黔南和滇南一线以南，冬季气温高，很少降雪，只有在个别的极端年份，强寒潮爆发南下，在广州、昆明偶有飞雪而已。

(二)屋面积雪分布系数

屋面积雪分布系数是屋面水平投影面积上的雪荷载(S_K)与基本雪压(S_0)的比值。实际上就是地面基本雪压换算为屋面雪荷载的换算系数。它是与屋面形式、朝向及风力等有关。

1. 风对屋面积雪的影响

在下雪过程中，风会把部分本将落在屋面上的雪，吹到附近的地面或其他较低的地方。当风速较大或房屋处于特强暴风位置时，部分已积在屋面的雪也会被吹走，从而导致平屋面或小于 10°坡屋面的雪压普遍比邻近地面上的雪压小。风的这种对雪的漂积作用与风速大小有关。风速大，漂积作用就大。

在低跨屋面的情况下，由于风对雪的漂积作用，会将较高屋面的雪吹落在较低屋面上，在低屋面上形成局部较大的漂积荷载。在某些场合，这种积雪非常严重，最大可出现 3 倍于地面

积雪。

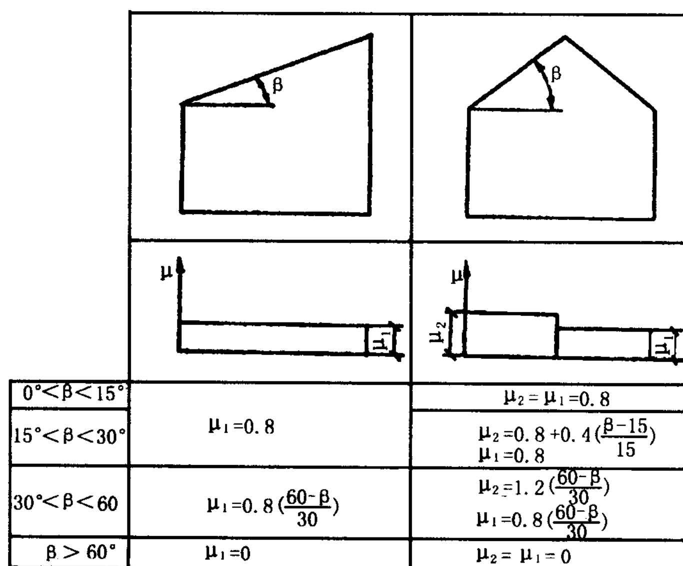
对多跨坡屋面及曲线型屋面，屋谷附近区域的积雪比屋脊区大，也是风吹雪而漂积造成的。

在完全无风的天气状况下，降雪将均匀地复盖在地面上和屋面上。那么，在此时设计的屋面积雪荷载完全可以认为是均布荷载。但是真正的均布荷载是不多的，一般仅在房屋四周有高树、高建筑物等掩护的地区才能见到。此时，屋面积雪分布系数将等于 1。

在大多数的地区，伴随着降雪经常是有风的。在一些屋面上，尤其是具有高低差的屋面，风使积雪不均匀分布。积雪深处的荷载可接近地面雪荷载。受四周房屋或树木等屏障的屋面，可能堆积比地面重的雪荷载。

2. 屋面坡度对积雪的影响

一般积雪深度随着坡度的增加而减少，这一方面由于风吹雪的影响，一方面与雪的滑移有关，当屋面坡度大到一定程度时，积雪就会在屋面上产生滑移或滑落，坡度越大滑落的雪越多。现在举一个单坡屋面和双坡屋面的例子，如图 3.3.8。



	单坡屋面	双坡屋面
0°<β<15°	$\mu_1=0.8$	$\mu_2=\mu_1=0.8$
15°<β<30°		$\mu_2=0.8+0.4\left(\frac{\beta-15}{15}\right)$ $\mu_1=0.8$
30°<β<60	$\mu_1=0.8\left(\frac{60-\beta}{30}\right)$	$\mu_2=1.2\left(\frac{60-\beta}{30}\right)$ $\mu_1=0.8\left(\frac{60-\beta}{30}\right)$
β>60°	$\mu_1=0$	$\mu_2=\mu_1=0$

图 3.3.8 单、双坡屋面积雪分布系数

图中 μ 为屋面积雪分布系数，β 为屋面坡度。由图可见，μ 与 β 有关，随着 β 增大 μ 在减小。如单坡屋面，β 在 30°以下时，$\mu_1=0.8$，当 β 大于或等于 60°时，$\mu_1=0$，当 β 小于 30°大于 60°时，$\mu_1=0.8\left(\frac{60-\beta}{30}\right)$。

3. 屋面温度对积雪的影响

冬季采暖房屋的屋面积雪一般比不采暖房屋少，这是因为屋面散发的热量使靠近屋面部分的积雪融化，同时，积雪还可能发生滑移现象。如美国对屋面温度对积雪的荷载的影响，规定对采暖结构取 1.0；仅保持在冰点以上的结构取 1.1；非采暖结构取 1.2。

屋面积雪在风、屋面散热和屋面形状等因素的共同影响下的效应，从而使实际的屋面积雪分布复杂多变。不同屋面形式将有不同的积雪情况。所以，我国建筑结构荷载规范给出了单跨

单坡屋面、单跨双坡屋面、拱形屋面、带天窗的屋面、带天窗有挡风板的屋面、多跨单坡屋面(锯齿形屋面)、双跨双坡或拱形屋面、高低屋面等八种屋面形式及积雪分布系数值。

第四节　采暖通风与空调计算

人类要建造一个舒适的环境,能冬天不受严寒冻害,夏天不受酷热的困扰,必须考虑当地的气候资源状况,采暖、通风和空气调节等,用人工的方法把室内气候调节到人体适合的温度、湿度、风速和清洁度。

我国从南到北地跨热带、亚热带、南温带、中温带、北温带等几个气候带。冬季在寒冷地带需要以采暖补偿冬季室内外温差而形成的房间热损失。冬季室内的温度一般要求保持在16～20 ℃,室外气温愈低,需要通过采暖补偿的热量也就愈大。夏季炎热的地区建筑物需要隔热、降温及空调。工业企业在生产过程中排放大量热、蒸汽、粉尘和有害气体,危害操作人员的身体健康,污染工厂周围环境,影响居民健康。为了防止有害物质对工人和周围环境的影响,必须保持通风良好,以及对污染加以控制和处理。

一、采暖计算

(一)采暖标准及区划

采暖是用人工的方法保持一定的室内温度,以创造适宜的生活条件和工作条件的技术。国内一直是按日平均温≤5 ℃的日数作为采暖临界温度,将采暖临界温度的开始和终止日期之间的整个时段称采暖期。采暖期中的天数称为采暖天数。全部天数的日平均温度的平均,即为采暖期室外平均温度。近年来随着经济发展,人民生活水平提高,实际情况已有改变。以北京为例,气温低于 5 ℃的日期大体从 11 月 9 日到次年 3 月 17 日,所以北京采暖期定为 11 月 15 日到翌年 3 月 15 日。然而在采暖开始的前 1～2 周和结束后 1～2 周,人们普遍感到冷,不舒适。因此一些单位从 11 月初就开始采暖,3 月末才结束采暖。我国其他地区也有类似情况。若按北京 11 月初至 3 月末为采暖期,那么确定采暖期的日平均温度应该提高到≤8 ℃,这样北京的采暖期应为 11 月 1 日至 3 月 29 日。不过根据我国能源及燃料的供求状况,把所有建筑物的采暖、室外临界温度统统提高到 8 ℃是不现实的,只能区别对待。

若把临界温度从 5 ℃提高到 8 ℃,燃料消耗量增加不到 7%。在采暖期更长的地方,其增加更少,如哈尔滨仅增加 3.8%。如果加强管理,杜绝浪费,提高锅炉供热效率,甚至可望在少增加的情况下,就会使采暖效果大为改善。

利用我国 1000 多个气象站资料,根据采暖临界温度≤5 ℃的天数,将我国区划为 3 个区,如图 3.4.1。

1. 集中采暖的气象指标

我国现行规范(采暖通风与空气调节设计规范,1989)集中采暖期仍采用的是按累年日平均温度稳定低于或等于采暖室外临界温度,一般民用建筑和生产厂房及辅助建筑物选取 5 ℃。凡日平均温度≤5 ℃的天数(必须说明,这里所谓的平均气温天数,系指连续 5 天的滑动平均≤5 ℃的天数),历年平均在 90 天以上的地区为集中采暖地区,如图 3.4.1。由图可以看出,集中采暖地区分布在沿淮河秦岭再沿青藏高原的东侧,穿横断山脉到云贵和西藏交界处这一线以北、以西的地区。

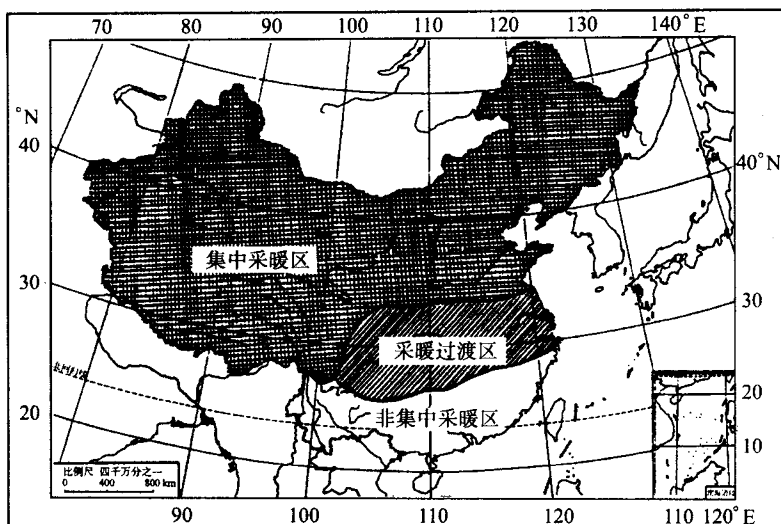


图 3.4.1 中国采暖区划图

由于我国各地气候差异较大，采暖区内各地气温≤5 ℃的天数南北相差很大，如河南洛阳 95 d，北京 129 d，沈阳 152 d，哈尔滨 179 d，内蒙古海拉尔 213 d。我国气温≤5 ℃天数最多在青藏高原，如青海玛多为 286 d，西藏那曲为 256 d 等。

玛多采暖期为从 9 月 2 日到 6 月 14 日。像玛多这类地区 1 年中仅 79 d 不采暖，若把采暖期的标准定为日平均温度≤8 ℃，那么玛多采暖期为 8 月 6 日到 7 月 14 日。1 a 中仅 22 d 不采暖。所以青藏高原是名副其实的高寒地区。

2. 采暖过渡区气象指标

由图 3.4.1 可以看出，采暖过渡区分布在集中采暖区以南，由浙江北部穿江西、湖南北部贵州南部到云南北部一线以北的地带，其面积约占全国的 15%。

采暖过渡区的气象指标不仅考虑温度，而且还考虑了湿度和日照条件。所以有两种情况，第一种是以日平均气温≤5 ℃的天数，历年平均为 60～90 d 的地区；第二种是日平均气温≤5 ℃的天数历年平均 45～60 d，1 月平均相对湿度≥75%和冬季(12、1、2 月)平均日照百分率≤25%的地区。

在过渡区内的东部和北部，基本上符合第一种情况，如河南的许昌、南阳、漯河、驻马店、信阳；陕西的汉中、略阳；安徽的合肥、蚌埠；江苏的南京、南通、盐城、东台；贵州的威宁、毕节、水城、修文、黔西和云南的昭通、维西等。符合第二种情况的如贵州的贵阳、遵义、湄潭、独山、安顺、凯里等。

在采暖过渡区，一般民用建筑没有采暖设备，只有在高级民用建筑设置集中采暖。在这一地区雨雪后还是很冷的，随着人们生活水平的提高，过渡区范围会缩小，如提高采暖临界温度，或考虑湿度的影响等。

3. 非集中采暖气象指标

这一区分布在采暖过渡区的南面，5 d 滑动平均的日平均气温≤5 ℃的天数在 45 d 以下，包括浙江、福建、江西、湖南、贵州和云南的南部；台湾、海南、广东、广西的全部以及南海诸群岛，如图 3.4.1。在这些地区有很多地方，5 d 滑动日平均气温≤5 ℃的天数等于零，大致从福州

的北部开始通过建阳、赣州、吉安、韶关、桂林、百色、昆明到云南边境连成一线，在这一线以南基本都是日平均气温≥5 ℃。

另外在四川盆地的中部如南充、万县、重庆、宜宾、西昌也有一片日平均气温≥5 ℃。因不易表示，所以包括在采暖过渡区内。

这里必须说明，5 d 滑动平均的日平均气温没有≤5 ℃的天数，但若以日平均气温而言，这一区除福建、广东沿海、台湾、海南及南海诸岛屿和云南西双版纳附近地区外，仍可出现≤5 ℃的日子。

(二)采暖室外计算温度

室外有别于室内，计算温度是经过处理的温度。采暖室外计算温度是采用历年平均不保证 5 d 的日平均温度。

采暖室外计算温度的高低，标志着寒冷的程度，是决定采暖设备多少的根据。上述的采暖期只说明寒冷的时间的长短，体现设备利用率的高低，以解决设置集中采暖是否经济合理的问题。而要理想地解决这个问题，就要使采暖系统的最大出力，恰好等于当地最冷时所需要的热负荷，但这一理想往往同采暖系统的经济性相违背。

从气象记录可以看出，气温的变化是波动的，最冷最暖的天气并不是每年都会出现。所以，采暖室外计算温度，不能按最冷年来设计，根据我国研究，采用不保证 5 d 的日平均温度。所谓不保证是指室外日平均温度低于采暖室外计算温度的天数，累年平均为 5 d。也就是说在平均年份，室外不保证为 5 d，在寒冷的年份，不保证天数多于 5 d，在温暖的年份，不保证天数少于 5 d。

不保证 5 d 是合理的。一般工业厂房及辅助建筑物的室内温度允许有一定时间低于设计值，同时在不保证的情况下由于围护结构的热惰性，室内仍有一定时间温度维持厂房温度的最低要求。如果采暖设备是选择历年最冷气温来设计，即把室外计算温度定得过低，那么，在采暖运行期的绝大多数时间里，就会显得设备能力富裕过多，造成浪费；反之，如果把室外计算温度，按温暖年份气温来设计，则在较长时间里不能保持必要的室内温度，达不到采暖的目的和要求。因此，正确地确定和合理地采用采暖室外计算温度，是一个技术与经济统一的问题。

二、通风的气象条件

建筑通风是改善生活和生产环境以创造安全、卫生的适宜条件而进行换气的技术，它是决定人们健康、舒适的重要因素之一。其中工业建筑通风还有保证产品质量，控制生产过程中的余热、水汽、粉尘和有害气体，创造一个安全、卫生、舒适的室内环境的任务。

我国采暖通风与空调设计规范中规定，夏季通风室外计算温、湿度，采用历年最热月 14 时的平均气温及其所对应的平均相对湿度。以最热月代表 1 年中最高气温的月份，14:00 时代表 1 日最热时间，其目的是按最不利气象条件作为设计的依据。

我国目前 4 次定时(02:00,08:00,14:00,20:00)观测，是按北京时。我国东西跨 63 个多经度，4 个多时区。最西边比北京晚了 3 个多小时，最东边的比北京早 1 个多小时。在北京的 14:00，最西端仅 11:00，最东为 15:00，并都不是最热的时间。要消除这一影响，才能得到合理的夏季通风室外计算温度。

我国 1960 年前，气象台站同时有两套观测即北京时和地方时。根据这些资料大致可以得出：时差 1 小时，北京时与地方时 14:00 的气温平均相差 0.2～1.0 ℃；时差 2 小时，相差 0.5～

1.7 ℃。时差影响最大的是西藏高原和西北地区，在 1～2 ℃左右。但是青藏高原夏季通风室外计算温度都在 28 ℃以下，按规定≥28 ℃的地区，民用建筑才采用通风屋顶，青藏高原在 28 ℃以下，所以通风温度对这一地区并无重要作用。只有西北地区通风室外计算温度较高，一般在 30 ℃以上，但这一地区湿度小，感觉温度低，在相对湿度由 90%降到 45%时，人的体感温度相当于降低 1～2 ℃。同时，在高温环境中，如相对湿度自 85%降至 45%，人体耐热时间要延长 1/2～1/3，所以可以不对时差引起的通风温度差进行订正。

通风可以采用自然通风和机械通风两种方式。自然通风是在室内外气温差、密度差和风压差作用下实现室内换气的通风。机械通风是利用通风机械 实现换气的通风。通风具有三种不同的功能。首先用室外的新鲜空气更新室 内由于居住及生活过程而污染了的空气，以保持室内空气的洁净度达到某一最低标准水平。此 类要求可称为健康通风，这是在任何气候条件下都应该予以保证的；其次是增加体内散热防止皮肤潮湿引起的不舒适，以改善舒适条件，此类通风可称为舒适通风；第三是当室内气温高于室外的气温时，使建筑物降温，此类称为建筑的降温通风。

(一)健康通风

为住户生活主要是呼吸和烹调提供必需的氧气量，防止过量的 CO_2 及令人不愉快的气味。由于人们的呼吸，室内空气无论如何也是要被污染的。为了更换新鲜的空气故需要通风。据估计成年人每小时约需 30 m^3 的新鲜空气，所以室内人数多少特别重要，亚格罗等给出通风效率，即整个使用面积内的有效气流与整个供气量之比。

气温与室内气味有很大的关系，当室内温度为 18 ℃时，人对气味没有不舒适感觉，那么房间内每人每小时需要 30 m^3 的新鲜空气，而当室内温度升高到 30 ℃时，若要人对气味没有不舒适的感觉，房间内每人每小时需要 50 m^3 的新鲜空气。

房间里如果感到有难闻的气味，首先应当排除这种气味，而通风换气是最好的办法。

对于厨房换气有热量平衡法，是根据厨房饮具、人、灯具和建筑围护结构冷负荷和室内外气温来确定；换气次数法，根据厨房大小，排风量大小确定换气次数；浓度稀释法，是根据理论计算或实验室内炉灶燃料和烹调时产生的有害物质数量，以及室外空气的有害浓度，按卫生标准规定厨房空气允许浓度，确定稀释有害气体所需的通风量；局部排风罩法，采用机械局部排风罩，将罩面上的有害物质直接抽走，提高有害物排放效率，其效率比全面排风提高 30%到 35%；罩口风速控制法使罩口风速控制在0.25～0.35 m/s。

自然通风排风量受室内外温度、湿度、大气压、风向和风速等因素影响，排风能力小，排风量很不稳定，有时排风口处于正压状态，发生倒灌现象。但我国目前尚不可能达到所有罩面采用机械排风。

对于居室和办公室，宜采用自然通风，在寒冷地区利用室外冷空气渗入室内进行补偿新鲜空气。

(二)热舒适通风

这是向室内提供舒适的热环境条件，也就是防止由于温热感及皮肤潮湿造成的不舒适。

热舒适通风取决于建筑内部的温度、水汽压和气流速度。炎热地区，人体舒适上限的室内卫生指标温度大约为 31.5 ℃。

根据中国医学科学院劳卫研究所的研究："当环境温度在 35 ℃以下时，对体温、皮肤、温度、脉搏的影响，变化不大，排汗量表现有跃增的现象。当环境温度高于 37 ℃时，上述各项变化

大大超出了正常的生理范围，对心血管系统则发生不良影响。”所以夏季通风室外计算温度≥33 ℃，允许有 2 ℃的温差，所以工作地点温度以 35 ℃为准。

（三）建筑降温的通风

空气的热容量很低，故建筑无通风时，室内气温将接近围护结构内表面的温度水平，其值与外表面温度接近。后者与墙面颜色有一定关系，同时还与结构的热容量与热阻的乘积有关。

当建筑物有通风时，室外空气以其原有的温度进入室内，并在流动过程中与室内空气混合，而且根据室内外的温差与室内各表面进行着热交换。

根据观测，当外表为灰色时，西墙内表面及室温的最高和最低值均因通风而有所降低。当为白色时，最高温度的升降随墙体材料的不同而定。

通风的作用量不但取决于墙的材料，而且还与墙的厚度有关。如果墙体较薄时，持续通风对于最高温度的降温作用较大。对于同一种厚度，则热阻和热容量较低的材料，通风的降温作用较大。

窗户全部关闭和打开对室温影响也很大。窗户关闭温度较低，如打开一扇窗户，室温可提高0.5 ℃，打开两个窗户可增加约 1 ℃。全部打开可提高室温 3 ℃，打开西向单面窗，提高室温 2.5 ℃，打开东向窗，仅提高 1 ℃左右。

通风的效果取决于室内外的温差。在室内温度高于室外的温度时，通风可降温。反之，则效果相反。所以傍晚、夜间室温较高，通风效果好。

我国炎热地区，采暖通风和空调规范规定为累年最热月平均温度≥28 ℃，且平均相对湿度≥75%的地区。在这地区选择合适材料很重要。

三、空调夏季室外计算温、湿度的确定

空调是为了满足生活、生产要求，改善劳动卫生条件，用人工的方法使室内温度、湿度、洁净度和气流速度等达到一定要求的技术。

空调室内温、湿度标准，对空调和冷冻的初投资和运行费是一个重要的因素。空调房间内温度基数为 20 ℃，但有的地方提高到 22～25 ℃，此情况下相对湿度对温度无疑也是影响很大的，当相对湿度为 50%～60%，比 70%～80%温度要高 2 ℃。也就是在气温 20 ℃左右相对湿度高，气温要低一些，相反，相对湿度小，气温要高一些。

夏季空调室外计算温度和湿度是采用干球和湿球温度来表示。这两项相配合确定室外空气状态点，作为计算围护结构夏季传热的最高温度。但是在夏季空调室外计算温度和湿度时，又应用了历年平均不保证 50 h 的标准，也就是每年有 50 h 的“超过时间”或不保证时间。取 50 h没有多大科学意义，应该是一个经济问题。不保证时数过短，则增大了空调设备的投资，同时在一般情况下或一般工艺生产中也没有必要；不保证时间过长，影响生产，失去了空调的实际意义。

不保证 50 h，对于不需要连续保证室内温、湿度房间，在一定时间内超过所要求的室内温、湿度，也是允许的。根据资料分析，50 h 大致分在 9～14 d，最热年在 19～20 d。如北京每年平均为 9.2 d，最热年 19 d，南京每年平均 12.6 d，最热年 22 d，长沙和武汉每年平均分别为 14 和 11 d，最热年为 21 和 14 d。虽然分布的时间这么长，但室内温、湿度的不保证时数，每年平均最多却只有 50 h。

夏季空调设计的室外空气计算参数，还有日平均温度，按历年平均不保证 5 d 来确定。不

保证 50 h 和不保证 5 d 实际上是十分接近的。不保证 50 h 上面谈到分布在 9～14 d 内，其中多数只有1～3 h室外气温超过规定温度，但围护结构有隔热作用，对室内影响并不大。室外温度太高以至于室内温度不能保证，实际上只有 5 d 左右。

根据以上分析，夏季空调室外计算温、湿度的 3 个参数是：(1)夏季空调室外计算干球温度(气温)是采用历年平均不保证 50 h 为标准；(2)空调室外计算湿球温度，也是按历年平均不保证 50 h 为标准；(3)夏季空调室外计算日平均温度，采用历年平均不保证 5 d 的日平均温度为标准。

第五节 中国建筑气候区划

我国地域辽阔，地形复杂，气候变化也有很大差异，对建筑设计要求应该有所不同。建筑气候区划的目的，在于科学地提出建筑上有关气候的技术依据，促使工业与民用建筑充分利用和适应气候条件，因地制宜，进一步满足人民生产和生活要求，为提高设计质量，降低工程造价，缩短设计周期，推广标准化定型化设计，为加快建设速度创造条件，并有利于进一步促使建筑更经济、更实用、更美观。

一、区划指标

建筑气候区划是反映建筑与气候关系的区域划分。由于影响建筑的气候要素很多，应以影响建筑的主导因素为主。主导因素各地不同，寒冷地区需要采暖、防寒、保温；炎热地区需要降温、通风、遮阳、隔热和防暴雨；沿海地区需要防台风、潮湿和暴雨；高原地区需防强日射等。

单一的主导气候要素作指标，往往不能完全反映气候条件在建筑上的作用。综合指标区划，强调区内气候的相似性，而又反映不出全国统一概念。中国建筑气候区划，采用了综合分析和主导因素相结合原则。

中国建筑气候区划按两级进行。

一级区划指标：分别以 1、7 月平均气温，7 月平均相对湿度、年降水量，日平均气温≤5 ℃和≥25 ℃的日数为指标，其各区具体指标值如表 3.5.1。

表 3.5.1 一级区划指标

指标 / 区名	主要指标		辅助指标	
	1 月平均气温(℃)	7 月平均气温(℃)及相对湿度	年降水量	日平均气温(℃)
Ⅰ(东北严寒区)	−10	16～25，≥50%	≥200 mm	≤5 ℃日数≥145 d
Ⅱ(华北寒冷区)	−10～0	18～28		≤5 ℃日数 90～145 d ≥25 ℃日数<80 d
Ⅲ(华中夏热冬冷区)	0～10	25～30		≤5 ℃日数 0～90 d ≥25 ℃日数 40～110 d
Ⅳ(华南炎热区)	>10	25～29		≥25 ℃日数 110～190 d
Ⅴ(云贵温和区)	≥0	18～25		≤5 ℃日数 0～90 d
Ⅵ(青藏高寒区)	<0～−22	<18		≤5 ℃日数>90～285 d
Ⅶ(西北干寒区)	<～10	≥18，50%	10～600 mm	≤5 ℃日数≥145 d ≥25 ℃日数<120 d

二级区划指标：在一级区划内，分别选取能反映该区内建筑气候差异性的 2～3 个气候参数或特征值作为指标值，如表 3.5.2。

表 3.5.2 二级区划指标

(3)Φ	年采暖期度日数(℃·d/a)	冻土性质	
ⅠA	≥7500	永冻土	
ⅠB	7500～5500	岛状冻土	
ⅠC	5500～4500	季节冻土	
ⅠD	<4500	季节冻土	
Ⅱ区	年采暖期度日数(℃·d/a)	7 月平均气温(℃)	7 月平均气温日较差(℃)
ⅡA	<2500	≥25	<10
ⅡB	≥2500	<25	≥10
Ⅲ区	基本风压(kPa)	7 月平均气温(℃)	
ⅢA	>0.4	26～29	
ⅢB	<0.4	≥28	
ⅢC	<0.4	<28	
Ⅳ区	基本风压(kPa)	日最高气温(℃)	
ⅣA	≥0.4	≥35 ℃,0.1～20 d	
ⅣB	<0.4	≥35 ℃,20～45 d	
Ⅴ区	1 月平均气温(℃)		
ⅤA	≤5		
ⅤB	>5		
Ⅵ区	1 月平均气温(℃)	年采暖期度日数(℃·d/a)	
ⅥA	<−10	<5 500	
ⅥB	<−10	>5 500	
ⅥC	>−10	<5 500	
Ⅶ区	年降水量(mm)	1 月平均气温	7 月平均气温(℃)
ⅦA	<200	<−10	≥25
ⅦB	>200	<−10	<25
ⅦC	<200	<−10	<25
ⅦD	<200	≥−10	≥25

上述一、二级区划指标，可以看出突出各级区内建筑的相似性和差异性。还可以看出各级区的划分原则必须有一定的建筑气候特征和相应的建筑基本要求为依据，假使仅有某一气候要素在程度上的较小差异，而目前建筑技术经济上无明显的反应，在这种情况下，没有必要再划区，据此，全国按一级指标划分为 7 个一级区，按二级指标划分为 20 个二级区。一级区反映全国建筑气候上大的差异，二级区反映各大区内建筑气候上小的不同，如图 3.5.1。

二、各区的气候特征及建筑基本要求

(一) Ⅰ区。包括黑龙江、吉林全境，辽宁大部，内蒙古东部以及宁、陕、晋、冀北部。其界线东起丹东向西经承德沿长城到西宁，此线以南为Ⅱ区。再从西宁向东北沿河套穿内蒙古中部到

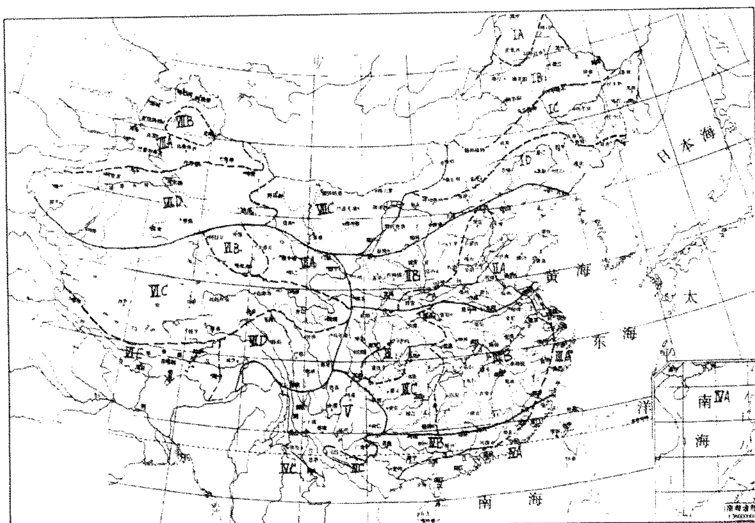


图 3.5.1 中国建筑气候区划图

锡林郭勒盟的西北部，此线以西为Ⅶ区。

在Ⅰ区内，再根据年采暖期度日数的多少，冻土性质这两个指标，又分为 4 个二级区。各区的气候特征：ⅠA 区为我国最冷的地区，长冬无夏，多积雪。基本雪压为 0.5～0.7 kPa。有连续多年冻土。最大冻土深度为 4 m 左右。ⅠB 区冬长 8～9 个月，近于无夏。基本雪压为 0.3～0.7 kPa。存在多年岛状冻土，最大冻土深度为 2.0～4.0 m。ⅠC 区冬长 7～8 个月，夏长 1 个月左右。东部基本雪压值较高为 0.3～0.7 kPa。最大冻土深度为 1.5～2.5 m。ⅠD 区冬长 6～7 个月，夏长约 2 个月。最大冻土深度为1.0～2.0 m。本区西部年沙暴日数为 5～10 d，年冰雹日数为 5 d 左右。

本区在建筑上的基本要求冬季太阳高度较小，房屋应有足够的间距以保证冬季室内日照条件。由于冬季寒冷期长，必须考虑采暖，外窗一般应设双层窗。夏季一般不考虑防热。在本区的西部多风沙，外窗应有防预措施。在北部冻土深度较深，需增加基础埋深。

（二）Ⅱ区。北临Ⅰ区，南与Ⅲ区的分界线是秦岭、淮河线。包括北京、天津，山东全境，河北、山西、陕西大部，辽宁、宁夏南部，甘肃中部以及河南、安徽、江苏北部的部分地区。

本区根据采暖度日数和 7 月平均气温、7 月气温日较差又分为两个二级区。ⅡA 区夏季气温高，7 月平均气温≥25 ℃，日平均气温≥25 ℃，天数为 20～80 d；暴雨强度大；冬、春多大风、风沙；沿海一带春、夏多海雾。ⅡB 区夏季气温较低，7 月平均气温<25 ℃；年平均相对湿度较低；春季多风沙；年降水量普遍少于ⅡA 区。

本区冬季寒冷干燥而且寒冷期长，但夏季亦较炎热。所以建筑上应以冬季防寒为主，适当兼顾夏季防热。房屋间距要能保证冬季室内足够日照条件，而建筑进深可以较大，以利于冬、夏季的保温和隔热。

（三）Ⅲ区。Ⅲ区与Ⅳ区的分界大致以南岭为界。包括上海、浙江、江西、湖北、湖南全境，江苏、安徽、四川大部，陕西、河南南部，贵州东部，福建、广东、广西北部和甘肃南部的一小部分地区。

本区根据基本风压值的大小和 7 月平均气温的高低，划分为 3 个二级区。ⅢA 区夏、秋常

有台风袭击，基本风压可达0.4～0.7 kPa。暴雨强度大，可有24 h雨量400 mm以上的特大暴雨，夏季不太闷热；ⅢB区夏季温高湿重，闷热天气多，最大积雪可达51 cm，四川盆地部分日照百分率极低，光照度偏低；ⅢC区夏季不闷热，日照百分率普遍较低。川南黔北日照百分率更低，光照度更偏低。

本区十分炎热、潮湿、炎热的时间长，而冬季湿冷，但寒冷期较短，建筑应以夏季通风、防热、降温、避雨、防潮为主，兼顾冬季防寒。

(四)Ⅳ区。在南岭以南地区。包括海南、台湾全境，福建南部，广东、广西大部以及云南西南部和元江河谷地区。

该区以风压大小和日最高气温≥35 ℃日数的多少划分了2个二级区。ⅣA区风压值高为0.4～1.2 kPa，年平均气温高，部分地区终年皆夏而不甚炎热；ⅣB区风压为0.3～0.4 kPa，冬季可受寒潮影响，两广热湿多雨，冬半年干燥凉爽。

本区只考虑夏季防热通风、隔热、遮阳、避雨、防潮，而可不考虑冬季防寒。从人体生理角度看，室温在12 ℃以下时，人会感到冷，影响人们的正常活动，所以维持室温12 ℃以上，是最低要求。这一区的界线是1月平均气温在10 ℃以上，据实测，在不采暖房间如不通风，室温可比室外平均气温高2～3 ℃，所以当室外平均气温在10 ℃时，室内气温可以维持12 ℃以上，能够满足人们正常活动最低要求，所以本区在建筑上不需防寒措施。本区雨季长、雨量大，屋面和地面的排水系统应适应这一特点。本区是台风活动地区，在建筑结构上应采取适当的防范措施。

(五)Ⅴ区。东临Ⅲ区、Ⅳ区，北面是Ⅵ区。包括云南大部、贵州、四川的西南部、西藏南部一小部分。

本区以1月平均气温≤15 ℃和>5 ℃的指标再分为2个区。ⅤA区冬无严寒，夏无酷暑，常年气温较低，气温日较差小为6～10 ℃，日照较少；ⅤB区四季如春，一雨成冬，降水天气易造成低温。气温日较差小。年雷暴日数偏多达120 d。年雾日偏多，可超过100 d。

本区最热月(7月)平均气温低于25 ℃，建筑上一般可不考虑夏季防热。由于日照较少，一般房屋开启大窗，以满足自然采光的要求。

(六)Ⅵ区。本区北为Ⅶ区，在与Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ的接壤。包括青海全境，西藏大部，四川西部，新疆南部一小部分地区。

本区以1月平均气温和采暖期度日数再分为3个二级区。ⅥA区冬季严寒，夏季凉爽。冬、春季多风沙，气候干燥。年降水量一般在25～200 mm，山地高处降水较多，可超过500 mm。ⅥB区全年皆冬，气候严寒干燥，为高原永冻土区，最大冻土深度达2.5 m左右，年沙尘暴日数为10 d左右。ⅥC区气温较ⅥB区明显偏高，冬季寒冷，夏季不热，降水较多，比较湿润；多雷暴且雷击强度大。西部地区年总辐射照度偏高，超过175 W/m²。年沙尘暴日数为20 d以上。

本区气温常年偏低，风大而气候干燥，太阳辐射强，日照时间长，本区建筑上只需考虑防寒，而且区内建筑可以充分利用太阳能，建太阳房等。

(七)Ⅶ区。本区东为Ⅰ区，南为Ⅵ区。包括新疆大部、甘肃北部、内蒙古西部地区。

本区以年降水量的多少和1、7月的平均气温高低，将本区分为4个二级区。ⅦA区冬季干燥严寒，为北疆冷中心，夏季干燥，为北疆热中心。日平均气温≥25 ℃的天数可达72 d；年降水量小于200 mm，基本雪压<0.3 kPa，最大冻土深度为1.5～2.0 m。ⅦB区冬季严寒夏季凉爽，较为湿润。基本雪压较高为0.3～1.2 kPa，最大积雪深度可达70～80cm，最大冻土深度为0.5～0.4 m以上，有多年冻土存在，高山终年积雪，有现代冰川，冬季多阴雨天气；夏半年4～

9 月山地多冰雹。ⅦC 区冬季严寒、夏季稍热。年降水量<200 mm，空气干燥，风速较大，多大风、风沙天气；日照丰富；最大冻土深度为 1.5～2.5 m，日平均气温≥25 ℃的天数为20～70 d。ⅦD 区冬季寒冷，夏季干热。日照丰富；平均风速较小，常年干燥少雨，多风沙天气。吐鲁番盆地夏季酷热，日平均气温≥25 ℃的天数约 120 d。

本区建筑应兼顾防寒与隔热，而防雨、防风、防潮要求不高，一般可不考虑。本区北部冰冻降雪期较长，且积雪较深，屋面构造必须有妥善的排雪设施。本区吐鲁番盆地，7 月平均气温 32.7 ℃，平均最高气温 39.9 ℃，极端最高 47.6 ℃，相对湿度 31%，年降水量 16.4mm，建筑主要隔热、降温、不宜利用通风降温，而宜隔绝室外热空气和太阳辐射的侵入。

第四章 交通、电力、通讯线网与气候

第一节 陆上交通与气候

一、交通事故与气候

天气对交通事故的影响有两重性。一方面，恶劣天气引发“额外的”事故，另一方面，在天气不好时人们减少外出，减小了车流量，又会降低事故发生的机会。一般来说，坏天气下的事故比好天气下事故多。交通事故造成了生命和财产的损失。如 1986 年 1 月北京一场大雪后，一昼夜发生交通事故 103 起，伤 47 人，死亡 5 人。香港 1994 年 2 月 11 日 17 时至 24 时，天黑、有雨、有雾，发生事故 50 起，损坏车辆 113 辆，伤亡 902 人；其间最严重的在 1 小时内，损坏车辆 21 辆，伤亡 177 人。据 1994 至 1996 年的统计，每年交通事故造成的死亡率，即每百万人死亡人数，香港是 42 人，纽约是 62 人，洛杉矶是 114 人，曼谷是 231 人，吉隆坡是 240 人。英国 1989 年公路交通事故造成的损失(包括救护车费用、警察耗时、治疗、财物和精神损失等)，达 60 亿英镑。英国学者研究认为，英国交通事故伤亡率的决定性因子是气候，而不是社会和经济因素。在美国和以色列，潮湿路面的交通事故比干燥路面要多出2～3倍。

关于交通事故，程秦全等作过详细的研究。香港有照车辆 1991 年为 374 954 辆，1997 年为 486 982 辆，7 年间车辆增加了 29.9%，车辆行驶里程增加了 70%，车流量有巨大增长，但道路设施和管理也有显著改善，平均每年事故总数只增加了约 0.57%。但是，1 日内交通繁忙时段的车流量比其他时段大得多。为了比较天气对不同时段的事故率的影响，资料要作予处理。香港的工作日(星期一到星期六)的繁忙时段是 8:00 至 20:00 时；非繁忙时段是 21:00 至 7:00 时。星期日也划分出繁忙与非繁忙时段。

(一)降水与交通

根据周晓珊的统计，沈阳到大连高速公路上交通事故最多的原因是由雨、雪和雾天气引起的，约占整个交通事故的 60%。雨、雪和雾天气的肇事率是正常天气的 5 倍。如以降水为例，即把每 1 小时的天气和路面状况归入互不相容的 4 类，即大雨、小雨、湿路面、干路面。统计全港不同时段在各类天气情况下的平均事故率，得到表 4.1.1。

表 4.1.1 香港不同天气下的交通事故率(次/h)

时段		天气和路面状况	干路面	湿路面	小雨	大雨
工作日	白天	事故率	2.31	2.56	2.89	3.55
		与干路面之比	1.00	1.11	1.25	1.54
	夜间	事故率	0.98	1.44	2.00	2.46
		与干路面之比	1.00	1.47	2.04	2.51

（续表）

时段		天气和路面状况	干路面	湿路面	小雨	大雨
星期日	繁忙	事故率	2.27	2.38	2.75	3.43
		与干路面之比	1.00	1.05	1.21	1.51
	非繁忙	事故率	1.25	1.71	2.29	2.68
		与干路面之比	1.00	1.37	1.83	2.14

降雨使事故率增大。大雨时又比小雨时大。

用北京1987至1994年资料分析，得出雨、雪日对交通事故影响较大，又以中雨影响最大。北京15个区、郊县的降水日数和事故数目的相关系数均在0.85以上，有的区竟达0.97。

（二）雾对事故的影响

雾会降低能见度，使驾驶人员难以及时判明前方的路况。能见度小于300 m，车速受到限制，小于50 m时，行驶困难。所以在有雾时事故显著增多。北京1999年11月22～24日连续3天大雾，北京公安交通管理局共接事故报警586起，造成这次大雾是由于由地面到1 km的上空形成逆温层，造成各种污染物扩散受阻，不断积累并滞留在低空，加之冬季大量使用燃煤取暖造成烟雾排放增加，从而进一步加重了空气中的颗粒与雾结合。因大雾北京交通管理部门不得不关闭京石、京津塘、八达岭高速公路，同时还关闭了京通快速路。北京的4条高速路同时封锁，这是第1次。

天津、上海、南京、西安、长沙等城市在1999年11月22～24日间都不同程度发生大雾造成的事故。如22日长沙至长益高速公路因雾发生20多辆汽车追尾特大事故，有3人死亡。22日沪宁高速公路全线封闭，西安、宝鸡高速公路关闭，而且使正常交通全面受阻。

（三）天气与事故的严重性

把每小时天气依其对交通的影响分为互不相容的几类中的一类：大雨，小雨，有雾，湿路面，干路面。对全香港的“事故严重性”和“天气”进行独立性检验（χ^2—检验）。

所有“环”的χ_i^2的总和χ^2定量地反映总体上“天气”和“事故严重性”的独立性。$\chi^2=718.0$，远大于显著性水平0.001的界限值，有相当大的把握拒绝“天气和事故严重性相互独立”的假设，可信两者有关联。第1行“大雨”对应事故“致命”，“严重”，“轻微”的3个离差是正的，意味着“大雨”引发这3类事故的机会，比“期望的”（假定天气对事故无影响）要大，尤以“严重”事故最为突出（χ_i^2的值很大）。“大雨”对应“无事故”的离差是负的，而且χ_i^2的值特别大，意味着大雨时几乎没有“无事故”的机会。“小雨”这一行的离差以及χ_i^2值表明小雨时发生“致命”和“严重”事故的机会较多，以严重事故较为显著；发生“轻微”事故的机会较少；不发生事故的机会很少。“雾”对应的事故情况和“小雨”的大体相似，但“致命”事故较多。“湿路面”往往引起轻微事故；发生致命的和严重的事故的机会甚少；无事故的机会也甚少。“干路面”很少发生事故，见表4.1.2。

表 4.1.2 香港天气和事故严重性的独立性检验

天气	统计量	事故严重性				合计	频率
		致命	严重	轻微	无事故		
大雨	实际频数①	87	871	924	97	1979	3.2
	离差②	24.6	284.8	71.2	−380.6		
	$\chi_i^2$③	9.7	138.4	5.9	303.3		
小雨	实际频数	270	2335	3265	1774	7644	12.4
	离差	28.9	70.9	−29.0	−70.7		
	χ_i^2	3.5	2.2	0.3	2.7		
有雾	实际频数	10	59	74	36	179	0.3
	离差	4.4	6.0	−3.1	−7.2		
	χ_i^2	3.4	0.7	0.1	1.2		
湿路面	实际频数	36	305	784	143	1268	2.1
	离差	−4.0	−70.6	237.6	−163.0		
	χ_i^2	0.4	13.3	103.3	86.8		
干路面	实际频数	1533	14607	21398	12760	50298	82.0
	离差	−53.8	−291.1	−276.7	621.5		
	χ_i^2	1.8	5.7	3.5	31.8		
	合计	1936	18177	26445	14810	61368	
	频率	3.2	29.6	43.1	24.1		100.0

注:① 该“环”的实际频数;

②离差(D)=实际频数(A)−期望频数(E)。期望频数是在“天气”和“事故严重性”相互独立的假设下,该环应有的频数;

③$\chi_i^2=D^2/E$.

(四)降雨-交通事故模式

气象台通常预报未来降雨的大小和降雨时间长短。如果能预测这场雨引起的后果,有助于加强防范。预测的根据就是降雨-交通事故模式。

描述一场雨需要3个参数:降雨时数、降雨强度和覆盖范围。后者最好用湿路面面积表示,但是,最详细的资料是事故记录,只能用“湿路面而且有事故”的小区数目表示,简称“湿事故区数”。显然,“湿事故区数”比湿路面区数要小得多,好在它们成正变关系,可以反映降雨覆盖范围的相对大小。

在无雨情况下,事故率有“正常的”的日变化。事故率的这些“期望值”可以从长年资料统计而得。建模时将任何1h(小时)的实际事故率减去该小时的“期望事故率”,得到“事故率距常”(单位:次/h),表示降雨和湿路面引发的“额外”事故率。

除了降雨3个参数外,模型还刻画雨前、雨时、雨后路面干、湿时的事故率距常。

历史资料中所有降水过程均按3个参数的数值进行聚类分析。对频率较大的,计算每一型降雨3参数的平均值和标准差,反映该类型的降雨特征(表4.1.3只列出频率最大的3个型的参数)。另计算每一类型各种“时数”和相应的“事故率距常”的平均值和标准差,反映该型降雨过程引发事故的特征。

表 4.1.3 香港的三个降雨型及交通事故

降雨的类型	小雨		中雨		大-暴雨	
频率(%)	69.8		18.1		4.8	
统计量	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
雨前干时数(h)	2.7	—	2.6	—	2.7	—
雨前湿时数(h)	0.1	0.50	0.2	0.57	0.3	0.75
降雨时数(h)	3.5	1.57	10.6	2.27	18.3	2.23
降雨强度(mm/h)	0.4	0.86	0.9	1.26	2.0	2.02
湿事故区数	0.8	0.83	1.3	0.74	1.5	0.52
雨后湿时数(h)	0.3	0.60	0.4	0.80	0.5	0.82
雨后干时数(h)	2.7	—	2.6	—	2.5	—
雨前干事故率距常(次/h)	0.17	0.84	0.14	0.95	0.17	0.86
雨前湿事故率距常(次/h)	0.08	0.42	0.05	0.36	0.14	0.59
降雨时事故率距常(次/h)	0.56	1.03	0.67	0.67	0.63	0.49
雨后湿事故率距常(次/h)	0.17	0.67	0.22	0.83	0.22	0.67
雨后干事故率距常(次/h)	0.19	0.86	0.06	0.90	−0.10	0.98

出现最频繁的是“小雨型”。降雨的时间短(3.5 h),雨势不强(0.4 mm/h),覆盖香港部分地方。引发的事故率距常是 0.56。整个降雨过程短,引发的“额外”事故大约 2 次。

其次是“中雨型”。持续半天左右,降雨强度比“小雨型”大 1 倍,达 0.9 mm/h。常常覆盖香港的大部分。每小时引起事故距常 0.67 次。在整个降雨过程中可以额外引发 7～8 次事故。它的影响集中在降雨时。雨后不到 1h 路面已迅速变干,事故率恢复到正常水平。

“大到暴雨型”。一般持续大半天,长的可达 1d(天)。降雨强度比中雨型要大 1 倍,平均为 2.0 mm/h,极端的达到 7.3 mm/h。过程总雨量平均为 37 mm,超过气象上定义的“大雨”标准。这型中的大者,过程总雨量达 160 mm,日雨量超过“暴雨”标准。覆盖全港。造成“额外”事故率距常约 0.63 次/h。因为持续时间长,每次过程平均引发 12 次额外事故。由于香港的排水系统好,大-暴雨后路面迅速排干,事故率很快恢复正常。

从天气系统分析引起杭州事故高发的天气系统,经统计研究认为是西南倒槽。

二、气象与公路、铁路车辆行驶

气象对公路车辆行驶的影响和它对城市交通影响颇为相似。

在气压低的高原和高山上,发动机的充气量低。海拔高度每增加 1 000 m,充气系数降低 3%～4%。充气量降低则混合气过浓,发动机过热,效率下降。发动机在 3 000 m 处的的效率只有海平面上的 65%,到 4 000 m 处只有海平面的 52%。气压低时沸点低,水易沸腾,冷却效率下降,供油系统容易形成气阻。

在炎热地区和炎热季节,发动机散热困难。机件过热,冷却用水和蓄电池电解液消耗很快,汽油泵和输油管中的汽油蒸发加快,供油系统容易形成气阻,发动机功率下降。气温在 30 ℃以上时,沥青路面软化、发粘,影响车速。

低温时挡风玻璃结雾或霜,如无消雾、融霜设备,车行滞缓甚至无法行驶。停驶时如不把水

散热器、水泵、水管等的水放净，可能冻裂。在气温低于－18 ℃时柴油需要加热，才能流畅，而且牵引力比常温下要减小 5%。如果温度降低到－28 ℃以下，牵引力减小 15%。

积雪时行车容易出事故。积雪在 20cm 以上不能通行。发达国家公路积雪时在路上撒沙或盐，既可吸收热量加快融雪，又可增加路面摩擦，防滑。同时，潮湿地区机件容易锈蚀。

在盐岩地带，当相对湿度大于 45%，水汽压大于 7.4 hPa 时，盐岩吸湿后溶解，卤水积在路面上成为“泛潮”，路面湿滑，行车容易发生事故，修建在盐岩上的铁路路基因溶解使承载力下降。

干旱地区的吹沙形成的沙丘可能埋没公路和铁路。沙尘使发动机容易磨损。降雨太强，列车司机视线不清，甚至看不清信号，路轨湿滑，列车要减速。铁路局对不同降雨强度时的列车车速有限制。如宝成线的有些路段，当降雨强度相当于日雨量 50 mm 时就要减速。当 4 h 雨量超过 50 mm 时，列车要停驶。

积雪对列车运行有影响。1955 年元旦江淮流域大雪，南京雪深达 51 cm，安徽寿县达 52 cm，铁路交通中断。1961 年 1 月 16 日浙江金华雪深 45 cm，铁路交通中断。一般来说，积雪达到 40 cm 时，列车要减速，超过 50 cm 时，不清除积雪就不能行驶。

遭遇横向大风列车可能倾覆。兰新铁路风口地区 1961 至 1982 年大风吹翻列车达 10 多次。上海等地制定出安全的风速标准是 22 m/s。如风速达 25 或 30 m/s 以上要考虑停驶。新疆地区风口处当风速超过 32 m/s 时停驶。可以仿照计算建筑物风压那样计算列车的风压，也可以计算出造成翻车的临界风速。

三、气候与铁路和公路建设

道路的规划、设计需要咨询气象部门的问题有：了解路线上天气灾害的频率和严重性，防止或减轻天气灾害的措施，参照天气灾害，对新线路作出选择。

道路设计和建设要考虑与气候有关的问题有：水害，泥石流和滑坡，冻胀，道路翻浆和积雪等。

水害指暴雨、洪水对道路的阻塞或损坏。暴雨和洪水，以及由暴雨引起的泥石流和滑坡，会阻塞或冲垮道路和桥梁。据 16 年的资料，我国暴雨、山洪冲毁铁路干线或桥梁，致使交通中断的，平均每年在 100 次以上。造成列车脱轨、颠覆等重大事故的，平均每年 6 次。水害的主因是暴雨。在一定的地貌、地形、土壤、植被、河流等条件下，造成洪水，泥石流和滑坡等灾害。道路规划和设计，必须疏导水流，防御水害。桥梁和涵洞的孔径和排水系统要能容暴雨径流宣泄，路基不应被洪流冲毁或淹没。工程设计时，视其控制的汇流面积和重要性采取适当的时段(从几分钟到几小时)的最大降水强度来设计。小、中、大桥分别取 50 年，100 年，300 年一遇的极值。道路主管部门会同气象部门曾研究过全国暴雨强度公式——概括各地不同时段、不同重现期的降水强度，用以计算小汇水面积上的暴雨径流过程。各地设计时可用以作宏观控制。多雨地带山区道路两侧，视地形、土壤、植被情况修建护坡，防止滑坡或泥石流。

土壤冻结时膨胀(“冻胀”)，路面隆起和开裂，凹凸不平，路基和路轨凸起，甚至损坏基础。解冻时土壤和水分变成泥浆从裂缝挤出，即是路面翻浆。在季节性冻土地带，公路、铁路的基础不应浅于冬季最大冻土深度。

我国西北、西南和东北山区冬季往往因为积雪、雪崩和吹雪使交通中断。新疆 1966 年一条公路因吹雪而致交通中断 6 个多月。同年特大雪崩使一条公路交通中断 4 个月。风速在5 m/s

以上就会吹起雪粒，吹到风速减弱的地方堆积起来，形成雪堆。雪堆的长轴和风向正交。雪崩的发生与否，与积雪新旧（密度不同）、深度和地形坡度有关，有经验公式可以估计。例如，在天山地形坡度为30°时，16 cm 以上的新雪就有可能出现雪崩；积雪达 60 cm 以上很可能雪崩。积雪可能阻碍铁轨道岔的合拢。选择路线时需要参考气候资料结合实地调查，使路线避开容易出现这些现象的地段。如道路走向与吹雪的风向一致，雪害可能减轻。有些地方要设置阻挡吹雪的藩篱。

公路如必须穿过常有浓雾的谷地，可以建设高架路，在雾层上面通过。大风，特别是大于 35 m/s 的风速，对路基有风蚀作用。对新疆一些“风区”和山口进行过实测，路基经 3 年风蚀后才达到稳定状态。在这样一些地段的路基要采取防风蚀的措施。

公路施工浇灌混凝土时要求气温不低于 4 ℃。铺设沥青时要求温度不低于 15 ℃。铺设路轨时，铁轨接头的缝隙要考虑极端最高和极端最低气温。

我国交通部门颁发了“中国公路自然区划图”，提供公路规划和设计时的参照。区划分为 3 级。主要针对道路冻胀、翻浆和水害问题进行分区。分区的指标：(1) 以年平均气温 −2 ℃线区分常年（永久）冻土带和季节性冻土带。此温度与东北地区多年平均最大冻土深度 2.5 m 相当。(2) 以 1 月平均气温 0 ℃线区分季节性冻土带和无冻土地带。此温度与多年平均最大冻土深度 0.15 m（东部）和 0.20 m（西部）相当。(3) 以湿润度（年降水量与可能蒸发量的比）0.5 和年降水量 400 mm 区分土基的干湿区。(4) 参考海拔高度 1 000 m 和 3 000 m 等值线来分区。这样，全国分为 7 个一级区。I 区是寒温带多年冻土区，路基要维持冻稳定性。II 区是温带季节性冻土区，主要问题是冻胀和翻浆，要注意融冻稳定性。III 区是黄土高原干湿过渡区，黄土易被暴雨冲蚀，或水浸陷落。要注意整体稳定性。IV 区是东南湿热区，要注意排水，提高水稳定性。V 区是西南潮湿区，注意维持土基的湿稳定性。VI 区是西北干旱区，要维持干稳定性，防治风蚀和沙埋。VII 区是青藏高寒区，应保证整体稳定性。

交通部门还制定了《沥青路面使用性能气候区划》。1 级区要注意炎热使沥青融化的问题。根据 7 月平均最高气温，参考气温≥25 ℃的积温进行划分。2 级区主要考虑路面干湿状况，根据降水量和中雨（日雨量 10 mm 至 25 mm）日数划分。3 级区考虑路面可能遇到低温，根据极端最低气温，结合负积温和冰冻指数进行划分。全国分为 15 区。

第二节　航海与气候

远洋航海、沿海航行、海上捕捞、海洋调查等海上活动受气象的影响甚大。

一、影响航海的气象条件

风影响船舶的航速、航向，以及使船舶漂移。大风掀起巨浪，造成船的横摇和垂直运动。横摇的周期如与波浪的周期相同，共振现象使摇幅增大，以至倾覆。风浪造成船的垂直运动。例如 6000 t、吃水 6 m 的船，在周期为 6 s 的波浪上航行，垂直运动的位移可达 2 至 2.5 m。如果船在浅水，可能触及水底。

雾会缩短灯标和灯塔的灯光投射距离和闪光时间。浓雾阻挡视线，可能使轮船偏航，甚至触礁或碰撞。1958～1974 年在海上发生的 2 000 次碰撞中，70%发生在视程不到 1.8 km 的雾中。1953～1978年日本发生海损事故 910 次，其中 60%发生在低压和浓雾天。

地球上任意两地点之间最短的路线是沿着通过两点的“大圆”。但是，由于地理，海洋和气候的原因，沿大圆走不一定是最佳航线。较佳的“气候航线”除了要考虑基本不变的因素如港湾、冰原、暗礁等以外，还要考虑常年的海洋因素(洋流、冰山、流冰等)和常年的气候因素(盛行风、大风、风暴、能见度等)。例如，从上海到加拿大，如在 40°N 以北跨越太平洋，要经过副极地低压带，冬季常有低云和雨雪，夏季常有雾；发展较深的温带气旋会带来大风。如果在 35°N 以南航行，能见度良好的频率在 95%以上，是一条较好的“气候航线”，又称气候定线或习惯航线。气候航线由海洋和气候资料定出，是平均意义上的较好的航线。每一次航行时天气不同，须事先取得“气象航路”预报，也叫做气象导航。它主要是按照启程港口至目的港口之间海洋上的中期天气预报，尤其是风暴(台风、飓风等)和雾的预报，从气候航线的宽带中选择出避开风暴和其他恶劣天气的最佳航线。发出航线预报后，预报机构还要跟踪船只，作出短期预报，随时提出航线的修正，指导船只平安到达彼岸。编制“气象航线”主要以中期预报为根据，而中期预报的制作，除了参考数值预报外，大多以天气气候统计为基础。

二、港口建设的气候条件

主要考虑风的状况，即各风向的频率和各向的最大风速。

(一)风暴潮是热带风暴袭来时，气压下降、风浪大作，海岸水平面短时异常升高的现象。潮水的高度与风暴强度(决定于中心气压和最大风速)和路径有关，大体上气压每降低 1 hPa 海水平面升高 1 cm；海水升高的幅度还与吹向海岸线的风速的平方成正比。如果潮水受风浪吹涌而在港湾壅积，潮位异常高。

(二)强风对船只泊靠码头的影响。在船只泊靠码头时，向岸风会推送船体挤碰码头。在系好缆绳后，离岸风会推送船体离开码头，扯紧缆绳。在设计码头泊位时，要考虑强风。

(三)风浪。拍岸浪有很大的冲击力。根据向岸风的风速、风向和海浪资料，结合海岸地形，设计防波堤。

(四)雾。港口船舶密集，来往繁忙。浓雾时视线受阻，容易碰撞。

第三节　航空与气候

一、影响航空的气象条件

(一)风及湍流与飞行

跑道应与盛行风向一致。飞机要逆风起降，以便获得较大的升力和阻力，便于修正航向，对准跑道，减小对地冲击力，缩短滑行距离。如果侧风的风速超过 9～12 m/s，飞机有滑出跑道或侧倾的危险。1999 年 8 月 2 日台湾“华航”一架客机由曼谷飞抵香港。时值台风逼近，香港新机场跑道是侧风。飞机冒强烈侧风降落，一翼触地折断，机身横滚翻 180°，机肚朝天机背擦地冲行，漏油烧成百余米火龙，最后机身几乎断为两截。幸好烟火只有小股进入机舱，当场死亡 2 人，伤 212 人，3 人危殆。

高空风向风速影响飞行的速度。逆风飞行有较大升力，可以增加载重量，但是，多耗燃料。顺风飞行则相反。高空风向和风速资料可以提供航线上常年的风的信息。

近地面风的垂直切变使飞机颠簸和偏离预定航向，增加起落操纵的困难。如果飞机在

100 m以下遇到风切变，没有足够的高度可以摆脱，容易发生事故。风切变依靠多普勒雷达观测。低空风切变常发生在浓积云和积雨云附近。造成风切变和阵风的中尺度系统有阵风锋和下击暴流，小尺度系统有微下击暴流，引发的阵风风速达 40～60 m/s。常规资料中，积雨云的资料有助于了解风切变发生的频率。对流和高空急流会造成颠簸，特别强的还会损坏飞机。浓积云、积雨云、雷暴和闪电是强对流的表现。

飞机穿过温度为 0～−12 ℃有过冷却水滴的云层，会形成飞机积冰。强烈的积冰可能导致事故。由高空温度资料可以知道 0 ℃层的高度的年变化。

（二）云、雾和能见度与航空

目视飞行固然要求一定的能见度，即使利用仪表飞行，在起、降阶段也要求一定的能见度。飞机进场时需要的是斜视能见度，但是，气象站只能提供所观测的水平能见度。云和视程障碍现象（雾、烟幕、霾、沙暴、尘暴、吹雪）和降水现象阻碍飞行员的能见度。起飞和降落要求某种"最低气象条件"。低于此种条件就难以升降。不同型号的飞机和飞行方式（如速度和升、降）要求的"最低气象条件"不完全相同。一般机场要求能见度不小于 5 000 m，云量达 7(成)以上的云高不低于 300 m。地形不复杂的备降机场要求能见度不小于 3 000 m，云高不低于 180 m。随着飞行技术和设备的改进，飞行的自由度越来越大，只在十分恶劣的气象条件下才要关闭机场。当云高低于 30 m，能见度小于 400 m 必须关闭机场。越来越多飞机可以几乎"全天候"飞行。不过，"全天候"飞行只是相对的，并非绝对不受气象影响。历史上那号称"不可沉没"的"泰坦尼克"号巨轮，首航就沉没了。人类"征服自然"的含义，决不是不顾自然条件，和大自然对着干，而是深入认识自然，利用自然规律，发掘自然资源，减缓或避开自然灾害。机场的云、能见度、视程障碍现象资料可以提供所需要的上述信息。气象有日变化。必须了解 1 日内不同时间各级能见度和低云高出现的频率，和雾的生成、持续和消散时间。从限制起飞、着陆的低云高和能见度出现的概率，可以求出机场关闭的频率和一条航线的航行率，和制定适当的航班时间表。如对广东几个机场统计了 2～4 月低云和不良能见度出现的时间和频率，制定航班计划时考虑当地能见度的特点，使航班正点率明显提高。

（三）其他气象条件与飞行

气温越高，空气密度越小，升力和阻力越小，载重能力越小，耗油量越少，起降滑行距离越长。对大多数喷气式飞机，气温每升高 10 ℃，起飞滑跑距离要增加 13%。气温、气压值用于订正高度表和空速表。

要了解视程障碍现象、降水现象和冻结现象的年变化和日变化。这些现象对飞机滑跑的影响类似于对汽车行驶的影响。

二、建设机场的气候条件

机场的选址要参考气候条件，即选择常年能见度好，低云、雾、强对流和大风出现频率小，没有地形造成气流波动和风切变的地方。

风吹过山脉会产生地形波，有很强的湍流；山脉抬升气流易形成云雾。所以机场不宜修建在山脉附近。如果不得不把机场修在山间谷地，应布置在谷地中部，少受山地造成的气流扰动的影响。决不能布置在风口和狭管地段。

避免在十分潮湿、容易产生低云和雾的大水体或低洼地附近修建机场。城市或工业区产生的烟、尘和大气污染物降低能见度。不宜在工业区的邻近、特别是它的下风方向建设机场。如

深圳机场东南方约 17 km 处有个妈湾电厂，由高达 210 m 的高烟囱排放热的烟气，含有颗粒物和飘尘。热气流可能直接干扰飞行，污染物会降低能见度。这不能不引起飞行管理当局的关注。经组织专家评价电厂对环境影响，证明了热气流冲到 800 m 高度就与环境空气充分混合，而飞机经过此处时超出此高度。电厂排放的颗粒物和飘尘可以使能见度减低到 6km，不至于危及飞行。主跑道应沿着盛行风向，减少飞机遇到侧风的机会。

第四节　电力、通讯线网与气候

一、气象对架空线路的影响

架空线路指高压送(输)电线路、通讯线路和电气化铁路的接触网等用铁塔、水泥或木质杆柱把电线架在空中的线路。架空线路穿越不同的气候区和地理环境，经受烈日高温，电击雷劈，狂风暴雨，严寒重冰。一旦电线中断，或杆塔倒塌，供电或通讯停止，对国民经济会造成巨大损失。我国通讯线路由于电线覆冰而倒杆的，1954～1955 年度为 1325 杆，1956～1957 年度为 1064 杆。云南省 1960～1994 年间，送电线路发生覆冰倒杆断线事故 101 次，少送电 12×10^9 W·h。1984 年 1 至 2 月，贵州大范围覆冰，使输电网割裂为 4 片。输变电设备直接损失 522.1 万元；用户线路及变电设备损失 444.2 万元；工交、邮电部门直接经济损失 2 048.5 万元；全省国营林场有一半以上受害；仅西部 27 个林场，受灾面积达 $2.2\times10^7 m^2$，损失木材 $6\times10^4 m^3$。美国 1990 年 3 月 7～8 日在衣阿华、南达科他和内布拉斯加州出现了大范围风暴和覆冰，严重处电线的冰厚达 120 mm。有一条 27 km 长的高压馈电线倒塔 78 基。各地共有 1 900 km 的电缆损坏，维修费需 1 500 万美元。两个州的电力系统直接损失约 2 000 万美元。仅一个城市对风暴所摧残的市容和房屋进行清理，就花费 210 万美元。

线路的覆冰和大风的随机性很大，设计标准若低于实际，难免发生事故。如我国 500kV 线路从 1988 年到 1993 年倒塔 4 次，计 19 基。分析其原因，是由于出现的冰与风荷载超过了设计荷载，以及材料和设计质量有一些实质性的缺陷。如果一味要求保证线路的可靠性，盲目按照高标准设计，投资成本太大，也造成经济损失。所以，要作出合理的设计，既保证安全，又节约投资。

(一)气象对线路的机械性能的影响

为叙述的方便，把导线、地线、避雷线、电话线及其附属小件设备如线夹、绝缘子等统称为电线。铁塔、水泥杆柱等支撑物统称为杆塔。所谓“线路”则包括两者。气象对线路的机械性能的影响有以下几方面。

1. 电线和杆塔承受的气象荷载。大风对电线施加水平荷载；覆冰对电线施加重力，连同电线的自重构成垂直荷载。覆冰还使电线受风的面积加大，使水平荷载增大。电线承受水平和垂直荷载的合力，称综合荷载，以“比载”计，即电线每米长、每平方厘米横截面积所受到的力。低温时电线收缩，拉力加大。冰与风综合荷载如超过器件的承受力，或者覆冰造成一档断线后杆塔两面的拉力不平衡，或杆塔两侧不同期脱冰造成拉力不平衡，都可能使绝缘子、金具或横担损坏，防震锤弯曲，球头磨损及变形，杆塔变形以至倒塌。如 1984 年 1 月 17～19 日华东三省不少线路覆冰达 6.5 N/m，超过设计荷载的 8.8 倍，折断铁横担 10 175 根，断杆 4 499 基。

2. 气象与电线的弧垂。电线下垂的最低点距悬挂高度的距离称为弧垂。为了保证电线距地有一个安全的距离，要控制弧垂。综合比载(γ)越大，气温越高(使电线的拉力 σ 越小)，档距 L 越长，则弧垂(H)越大。它们有以下关系：

$$H = L^2\gamma/8\sigma. \tag{4.4.1}$$

为了控制弧垂，要了解可能造成最大弧垂的温度和荷载的情况。

3. 气象与电线的振动。微风吹过电线，背风一侧涡旋不断生消的冲击力，使电线发生高频的颤动。颤动频率如与电线的振动频率共振，形成"微风振动"。它使线夹处的电线发生金属疲劳，直至断股断线。阵风对电线、特别是覆冰的电线有铅直的分力，使电线发生铅直方向的舞动。通讯线舞动会绞线；损坏绝缘子；使绝缘子翻转到横担上；使杆塔的结合点松动。

4. 覆冰与电线的扭转。覆冰往往先在电线的迎风一侧增长，对电线产生扭转的力矩。电线扭转时如果发生舞动，可能在线夹附近折断。

(二)气象对线路的电气和电讯性能的影响

1. 雷电　雷电感应或击中电线，产生超常的"大气过电压"，使导线和杆塔或横担之间发生闪络，损坏线路，或击穿绝缘物，破坏电器设备。

2. 雨、雪和雾　导线周围一薄层空气若被电离，电线会向外持续放电，有光，称为电晕。电晕损耗电力。下雨、下雪或浓雾时，空气潮湿，容易发生电晕；使设备绝缘能力降低，容易发生闪络、跳闸甚至短路；通讯线绝缘力减低，讯号衰弱，通话质量降低。覆冰时通讯线载波衰耗大，杂音增加。

3. 风　风使电线偏离平衡的位置，是为风偏。风偏使导线和其他物体的间隙减小，可能发生闪络放电，烧坏电线，或使瓷瓶老化而减弱绝缘能力，跳闸或短路。风从横向吹来，使并排的几条电线不同步地摆动，有时会闪络或绞线。

4. 覆冰　覆冰使导线弧垂增大，对跨越物(如通讯线、树木等)闪络放电。电线覆冰时表面不规则，风吹过时产生不同方向的分力，电线容易舞动或摇摆，使部分覆冰脱落，电线跳跃。跳跃激发电线这个弹性系统发生波动，使覆冰陆续脱落，继续引发跳跃。脱冰不均匀使导线跳跃舞动，称为"脱冰跳跃"。舞动和脱冰跳跃有时使导线和地线或避雷线靠近，间隙不足而放电，可能绞线。

二、电线覆冰形成的规律

电线上的覆冰，即冻结物，包括雨凇、晶状雾凇、粒状雾凇、湿雪(有称雪凇或冻结雪)、霜和混合覆冰(两种或多种冻结现象的混合物)。气象、电力、邮电部门人员和群众对之有各种称谓。本书统称之为电线覆冰，简称覆冰。

线路设计要的覆冰荷载，从冰厚和密度计算，或直接用每米长电线的冰重(g/m)。电线覆冰的常规资料，是气象站雨凇架的观测资料。专设的雨凇实验站，电力部门称"观冰站"，则提供细致的资料。由于覆冰现象具有显著的微气候特征，表现出很大的局地性和随机性。技术人员是否掌握电线覆冰形成的理论和电线覆冰的微气候特征，是能否提供正确设计数据的关键。

实测最大冰厚 B_0(或冰重)不能直接用于设计，而要考虑到各种因素，经过多重订正或计算而求得设计冰厚 B。

$$B = f(B_0, h, T, U, L, \varphi)\ , \tag{4.4.2}$$

式中，h 是(离地)高度，要把实际观测高度的冰厚订正为电线悬挂高度的冰厚；T 是重现期，要经频率分析算出指定重现期覆水的极大值；U 反映不同小地形上覆冰的差异；L 反映不同档距覆冰的差异；φ 是电线直径，要考虑观测的电线直径和设计电线直径的覆冰的差异。式(4.4.2)不能用解析式表示，只是指出要考虑的主要因素。

(一)覆冰的物理过程

认识覆冰在电线上形成的物理过程，是研究覆冰的变化规律的基础。下面介绍描写覆冰形成物理过程有代表性的几个模式。

1. 雾凇覆冰的物理模型

假定单位长度的电线的截面为 φ，单位体积空气中的过冷却(0 ℃以下)液态水滴的重量是 W，风速是 V，风与电线的交角是 θ。水滴在气流中自由下沉的速度远小于 V 可忽略不计。如果气流不被电线干扰，单位时间内水滴经过单位长度电线截面 φ 的量是

$$WV\varphi\sin\theta. \tag{4.4.3}$$

但是，气流在抵达电线之前就分岔，水滴有一部分随之越过电线，只有一部分截面积为 A 的小股气流中的液态水，凭着惯性撞击在电线上。在单位时间内，水滴实际积聚在电线上的量是

$$WVA\sin\theta. \tag{4.4.4}$$

两个量之比，定义为捕获系数

$$E = A/\varphi, \tag{4.4.5}$$

它反映水滴因惯性前进而积聚在电线上的效率，是水滴运动的惯性参数和空气运动的雷诺数的函数，与水滴半径、水滴运动速度(大致上等于风速)、空气的密度、粘性和电线直径有关。

被捕获的液态水只有 $\beta\%$ 冻结成冰，其余的蒸发掉了。β 称为冻结系数，与风速、电线的直径、空气的含水量、温度和覆冰的持续时间有关。为简便计，在时段 τ 内取各变量的时间平均值。在单位长度电线上的覆冰重量(有称为"线密度")

$$P = WEV\beta\varphi\tau\sin\theta. \tag{4.4.6}$$

为了使最后结果的形式最简单，不失精确地假定电线的表面积 $\pi\varphi$ 展开成平面，覆冰平铺在它上面的厚度是 b，则冰重

$$P = b\pi\rho\varphi, \tag{4.4.7}$$

式中，ρ 是覆冰的密度(数值上等于比重)。最后得到雾凇覆冰的物理模型是

$$b = (1/\pi\rho)WEV\beta\tau\sin\theta, \tag{4.4.8}$$

该模型经实测资料验证相当准确。

2. 雨凇覆冰模式

査尼-斯开弗斯(Chaine-Skeafes)模式可以有效地估算雨凇的增长。它的基本概念是先分别估算水平面上和铅直面上冻雨的积聚量(厚度)，再换算为等效的圆筒形覆冰的厚度。

水平面上覆冰的积聚量(深度)R 是降(冻)雨的速率(cm/h)，t 是降雨时数。

$$B_H = Rt. \tag{4.4.9}$$

铅直面上覆冰的积聚量 B_V，与风速和降雨速率及降雨时数有关。假定捕获系数为 1(偏大而安全)，有经验关系

$$B_V = 0.195V(R^{0.88})t, \tag{4.4.10}$$

V 是风速。式中的常数还调整了几个不同变量的单位的量级差异。

以上的覆冰积聚量如果换算成圆筒状裹覆半径为 λ 的电线,等效厚度为

$$B = [3.23K\lambda/(B_H^2 + B_V^2)^{1/2} + \lambda^2]^{1/2} - \lambda. \qquad (4.4.11)$$

式中 K 是冰在不同尺寸圆柱体上实际积聚量与理论计算量之比值,与圆柱体直径和温度有关,由实验确定,已制备曲线可查。

3. 覆冰的天气模式

模式要描述形成覆冰的动力、热力和其他过程。输入所需液态水含水量和水滴大小没有直接观测,只能按经验关系由常规观测数据代替。加拿大,挪威,英国,法国和日本正在研制和使用这类模式。挪威在 1971 和 1973 年先后建立了两个覆冰实验站,海拔 950 m 左右,有连续测冰的设备和地面、高空气象探测设备。模式的基本概念是,在达到覆冰的必要条件时(气温 0～－10 ℃,相对湿度 100%),覆冰量

$$P = f(V, W, \mu)t^a, \qquad (4.4.12)$$

式中 V 是风速,W 是空气中液态水含量,μ 是水滴直径,t 是覆冰的持续时间,a 是大于 1 的常数。从此概念出发,利用覆冰实验站的资料,结合全国 250 余站地面和高空的气象资料,探讨覆冰的天气模式,包括地形的影响。W 和 μ 无直接观测,用气象资料(包括高空资料)估计。例如,含水量与气块的源地和轨迹以及云的温度有关。水滴直径与云状、云的温度、风速、气流上升速度有关,可以利用云雾实验站给出的关系用常规资料估计。用覆冰和气象资料,反复试验和修改式(4.4.12)的函数形式,并拟合其常数。

(二)电线覆冰的密度

各类覆冰的密度不同,在不同的天气和地理环境下又有变化。

1. 雨凇　密度大体上为 0.5～0.9(g/cm³)。前苏联 1 300 余站万余次观测得雨凇的平均密度是 0.58 g/cm³。密度随天气情况和地理环境有所变化。其密度与海拔高度的关系不明显。表 4.4.1 是我国测得的有代表性的数据。

2. 粒状雾凇　密度多在 0.2～0.4 g/cm³ 间。我国测得最大值为 0.58 g/cm³。海拔越高,密度越小。

3. 晶状雾凇　密度约为0.01～0.08 g/cm³。它密度小,厚度薄,对线路无影响。

4. 混合覆冰　密度为0.3～0.6 g/cm³,视其组成而异。雨凇比例越大则越重。

5. 湿雪　密度多在0.06～0.23 g/cm³之间。

我国设计时对覆冰密度两种取法:一种是不同覆冰取其常见值:雨凇0.7～0.9 g/cm³,雾凇0.1～0.3 g/cm³,混合覆冰0.2～0.6 g/cm³,湿雪0.2～0.4 g/cm³。高海拔地区靠近下限取值,低海拔地区靠近上限取值;另一种是雨凇取0.9 g/cm³。其余不同种类覆冰的厚度打个折扣后,用统一密度0.9 g/cm³。雾凇和湿雪的厚度乘以1/4;混合覆冰的厚度折半。

三、电线覆冰的的地理-气候背景

(一)覆冰的大尺度地理分布

表 4.4.1　我国实测的典型覆冰密度

地点	海拔高度(m)	平均密度(g/cm³)(变化范围)				记录时间(观测次数)
		雨凇	雾凇	混合覆冰	湿雪	
云南海子头	3 228		0.329 (0.11～0.42)			1982～1987 (117 次)
云南会泽二道坪	2 700		0.16 (0.09～0.26)			1962 (8 次)
云南昆明太华山	2 358		0.299 (0.06～0.30)			1981～1986 (32 次)
云南昭通大山包	3 120		0.226 (0.08～0.39)			1981～1988 (276 次)
云南中甸	3 400				0.15 (0.06～0.23)	1957～1976
四川会东			(0.07～0.37)	(0.3－0.6)		1965
贵州双流	1 500	(0.67～0.90)				
湖北绿葱坡	1 817	0.49	(0.10～0.20)			1957～1974
陕西秦岭光秃山	2 880			(0.38～0.67)		1975～1976
江西井冈山盐山垭口	925		0.191			1983～1984
山东潍坊，益都					0.22	

每年冬季都具有形成过冷却雾滴或造成冻雨的天气条件的地带为成冰地带。形成过冷却雾滴的天气主要是辐射雾，同时温度从－2 至－30 ℃。过冷却雾滴随微风飘扬，冻结在电线、树枝等物体上，形成雾凇。高山、高原的地方如在云中有过冷却云滴，云滴与地物接触即成雾凇。形成冻雨的天气条件主要是有冷锋或静止锋倾斜地介于冷暖气团间。锋面以上(暖气团)云层很厚，很大高度上有冰晶、雪花和过冷却水滴共存。雪花和过冷却水滴下落时，在锋面上经历略高于 0 ℃的气层，雪花会融化成湿雪或过冷却水滴，连同下落的过冷却水滴，穿过锋面落到 0 ℃以下的冷空气中，保持过冷却状态，落到地物上，碰撞的震动使过冷却水滴变成固态的明冰。冻雨积聚在电线或地物上便是雨凇。

我国东北，华中，西南广大地带和华南的南岭以北冬季具有上述的天气和温湿度条件，成为成冰地带。西北、华北也比较冷，为什么很少严重的雨凇覆冰？主要是“制造”冻雨的天气系统的活动特点造成的。冷空气进入我国经过西北和华北时所抬升的当地的“暖空气”原来就在

北方，水汽甚少，往往少云、无雨，自然无冻雨出现。冷锋到达东北时，抬升的是来自华中、华东的较为暖湿的空气，冷暖空气交汇时有浓密的云层和雨雪。在温度结构适当的情况下便有冻雨落下。冷锋南段到达南岭有时成为“南岭准静止锋”；冷空气从华中或四川回流到云贵高原，有时静止成“昆明准静止锋”，有机会带来冻雨。雨凇的密度大，使得华中、华南和西南各省(区)出现有危害的覆冰。

在成冰地带内，覆冰较频繁和严重的地方的特点是 (1)造成雨凇的天气系统活动频繁。如云南东北部和贵州冬季常有“昆明准静止锋”滞留，经常覆冰。相对地，云南西北部横断山脉冬季温度也低，但是几乎没有冷锋进入，更无静止锋，盛行来自热带大陆的气团，比较干燥，覆冰就很少。(2) 海拔比较高。成冰地带内，大体上从某个高度开始覆冰。云南覆冰的起始海拔高度，东北部是 2 200 m，中部是 1 800 m，南部是 1 600 m。在这些高度以上，冰厚随高度增加。如云南中部，海拔 1 800～2 000 m 冰厚约 5 mm，2 100～2 300 m冰厚约 10 mm，2 400～2 500 m 冰厚约 20 mm，2 500 m以上冰厚约30 mm。不过，并非所有地区覆冰都是随高度增加而单调地增加的。有些地区到了一个“覆冰最大高度”以上，覆冰反而减弱。贵州的覆冰最大高度在西部地区为1 700～2 000 m；中部地区为1 100～1 400 m。(3)山脉的迎风坡，覆冰的起始高度比背风坡低，也比背风坡重。例如，冬季有时冷空气从贵州和四川东部流向云南，乌蒙山东侧是迎风坡，海拔1 500 m处就有覆冰，且较严重；西侧是背风坡，要到海拔1 900 m才有覆冰。

由于电线覆冰局地性强，在地域上连续性很差，不适于用等值线图表示。表 4.4.2 列举我国典型的电线覆冰记录(记录到的最大覆冰的概约值)，反映我国覆冰的大尺度地理分布。表中未包含特殊小地形造成重冰的所有记录。表中的“直径”是均匀裹覆电线的“等效直径”(包含电线的直径)。

表 4.4.2 我国各地典型的电线覆冰记录

省区	地区	海拔高度(m)	覆冰类型	冰厚(b)或直径(D)[①](mm)	冰重(kg/m)	密度(g/cm³)	记录时间(年.月.日)[②]
黑龙江	齐齐哈尔，嫩江	150～200	湿雪	b=40～60	1.072		1980.10.25～26
吉林	通化	<200	混合覆冰	b=20～40	4.0		1953～1964
辽宁	鞍山	<100	雨凇	D=55	1.59		1957～1964
青海	垴山	3321～3348	混合	b=30		折成 0.9	1992.10.4～5
河南	豫东	200～400	雨凇，混合覆冰	D=50～100	1.1～1.4		1979
	伏牛山	1521～1893	湿雪	b=50～60	>2.02		1987.2.18
湖北	武汉大冶	100～200	混合覆冰	b=38.5			1954～1957
湖南	南岭，道县麻江	500～1300	混合覆冰	D=168	15.3		1977.1.17
	羊古岭	590	混合覆冰	b=60	11.5		1964.2
山东	淄博，潍坊	200～500	雨凇，混合覆冰	b=50	>1.0		1882.11.9
安徽	燕湖	300～700	雾凇	b=35	5.0		1969

（续表）

省区	地区	海拔高度(m)	覆冰类型	冰厚(b)或直径(D)①(mm)	冰重(kg/m)	密度(g/cm³)	记录时间(年．月．日)②
江西	梅岭	500～842	混合覆冰	D=300	19.25		1972～1975
福建	矾头至龙岩	900～1075	雨凇	b=50～60	>1.27		1980.2.8
广东	乳源和乐昌交界	700～850	雨凇	b=38.2	6.4		1984.1～2
广西	金竹坳及大明山区	900～1500	混合覆冰	D=80～140	>1.73		1975.12.9，1976.12.26
	会东	2500～3100	混合覆冰	D=300	>7.0		1972
四川	雷波老林口	2081	混合覆冰	b=80	24.2	0.39	1988.3
	美姑黄茅梗	835	雾凇 混合覆冰	b=52 b=42	11.8 8.3	0.19 0.22	1989.3.9 1985.3.18
	双流	1600	雨凇	D=200	12.15		1966～1967
	习水二台子	1700	雨凇，混合覆冰	D=100～350	1.03～4.42		1984～1985
贵州	八大山（水盘线）	2000	雾凇	D=240 b=680	15.0	0.5	1974.12～1975.1
	六盘水	混合覆冰	b=40～60	13.0	折算为0.9		1984.1～2
	昭通大山包	3119.6	雾凇	b=98	6.238	0.179	1983.12.28
云南	昭通新华	2200	混合覆冰	b=63.11	7.0	0.45	1984.2.6
	昆明太华山	2358.3	雾凇	b=39.7	2.4	0.284	1981.12.20
	东川海子头	2700～3280	雾凇	D=300	>7.0		1961～1962
	滇黔交界	2000～2100	混合覆冰	D=350	18.68		1984.1

① "直径"包含了电线直径

②"记录时间"如是一段时期，表示是在这段时期所测得的典型值

电线覆冰在世界上许多地区都有发生。一些国家（或地区）典型的雾凇覆冰厚度记录：捷克(15 mm)，加拿大和德国(20 mm)，前苏联(25 mm)，西班牙(30 mm)，法国(40 mm)。雨凇：澳大利亚(14 mm)，美国(20 mm)，日本(23 mm)。混合覆冰：前苏联(30 mm)，日本(50 mm)。和这些国家相比，我国严重地区的冰厚一般超过以上纪录。

除列出的省（区）外，报告有电线覆冰的还有山西，陕西，浙江和广西，除局部山区外，覆冰不严重。没有正式发表电线覆冰研究成果的省（区）有新疆、西藏、甘肃、宁夏、河北、海南、台湾。但是，西北、华北和西藏等地区的山地完全可能有雾凇覆冰。

（二）小地形造成的局地重冰区（段）

在成冰地带内，某些小地形（有称"微地形"）造成特别严重的覆冰，形成小的"重冰区"，"特重冰区"（或很短的一地段）：

1．垭口型：两山之间的低凹处。此处风速加大，过冷却水滴的输送特强而形成重冰。表4.4.3中湖南羊古岭一例，在一档内不同位置上冰重（又称"线密度"）相差竟达10 kg/m。四川

美姑黄茅埂观冰站海拔 2 100 m 的老林口观冰点测得覆冰的冰重达24.6 kg/m。

2. 山脊型：两低地中间的山脊，或两个水系或两条河流间的分水岭。此处相对高度高，空旷，风速大，过冷却水滴的输送强；无论气流来自哪一侧，都受地形抬升而冷却，形成重冰。秦岭北坡陕西境内海拔 2 830 m 的天线塔拉线上，覆冰的直径曾达 550 mm，冰重达 34 kg/m。

3. 水边型：湖泊、水库或江河的近旁。气流从水体吹带来丰沛水分，加上爬坡冷却，形成重冰。云南昆明东郊，气流经阳宗海（海拔 1 773 m）爬上老鹰山（海拔 2 448 m），既含有丰沛水分，又被地形抬升，1961 年 1 月 13 日导线覆冰直径达 200 mm。

4. 地形抬升型：盆地一侧陡崖、台阶地形、山区的高峰。这些地形的迎风侧，抬升气流加强冷却，形成重冰。1984 年 1～2 月，贵州六盘水地区发生了连续 40 多天的覆冰，110 kV 水盘线导线上，雾凇圆形覆冰的直径达 400 mm，使 AG 杆避雷线支架折断。

将特殊地形造成重冰的例子和邻近地方比较，列于表 4.4.3。

表 4.4.3　特殊小地形与邻近对照点覆冰的对比

典型例子					邻近对照点			
地形类别	地点	海拔(m)	覆冰种类或密度 (g/cm³)	强度* P(冰重) b(厚度) D(直径)	出现时间	地点	重现期(年)	强度* p,b,D
垭口	湖南柘乡线，羊古岭正对风口		P=11.5	1964.2	同档	15	P<2.8	
	江西，井冈山，盐山	700～925	0.191	b=210. P=7.5		井冈山气象台	15	b=37
	云南，晋宁，盘龙山.	2087～2370		D=60	1996.2. 19～22	昆明，太华山气象站	45	b=12
地形抬升	广西，融桂线，金竹坳和土地庙	（比气象站高数百米）	雨凇	b=30	1977. 1.28	沿线气象站	15	b=5
	湖北，葛州坝东北	530～578	0.84	b=36	1994. 11.14～16	荆门气象站	15	b=10

* 强度的单位：冰重 P(kg/m)；b(厚度，mm)；D(直径，mm)

乌克兰 150 站 7 类地形雨凇覆冰强度的比较（表 4.4.4）

可见，覆冰最严重的地形丘陵顶部和向风陡坡的极端最大覆冰直径竟相当于最轻微的地形狭窄河谷的 4 倍以上。

表 4.4.4　乌克兰各类地形雨凇覆冰的强度

地形类别	平均最大直径(mm)	极端最大直径(mm)	极端最大直径	
			与G类比	与A类比
A：狭窄河谷	11.3	24	0.24	1.0
B：受屏障的丘陵	20.8	59	0.51	2.5
C：平原	19.0	53	0.50	2.2
D：高地	16.9	28	0.27	1.2
E：小分水岭	22.4	56	0.55	2.3
F：丘陵顶部	33.0	106	1.04	4.7
G：向风陡坡	42.7	102	1.00	4.3

在没有实际资料的情况下，我国覆冰的地形订正系数的参考值是在风口取平原的1.5～1.9；在迎风坡取1.4～1.6；在背风坡取0.7～0.8。有时将线路路径略为改动，即可避开重冰；或仅仅在重冰段加强线路结构。

小地形对覆冰密度也有影响。把前苏联欧州领域1 000多站的地形分成7类，统计25 000多次观测的不同地形下各类覆冰的平均密度如表4.4.5。

从表4.4.5看到，除晶状雾凇外，各类覆冰密度在不受屏障的地形下(C,E,F,G类)一般比平原大；在受屏障的地形下(B,D类)一般比平原小。在科拉半岛测得，风速较大时覆冰的密度较大。此结果与前者大体一致，因为不受屏障的地形风速一般较大。

表 4.4.5　前苏联欧州领域不同地形的覆冰密度(g/cm^3)

地形	雨凇		粒状雾凇		晶状雾凇		混合覆冰		湿雪	
	密度	与A类比	密度	与A类比	密度	与A类比	密度	与A类比	密度	与A类比
A	0.54	1.00	0.12	1.00	0.05	1.00	0.21	1.00	0.24	1.00
B	0.41	0.76	0.09	0.75	0.05	1.00	0.22	1.05	0.20	0.83
C	0.62	1.15	0.16	1.33	0.05	1.00	0.33	1.57	0.28	1.17
D	0.45	0.83	0.12	1.00	0.06	1.20	0.25	1.19	0.22	0.92
E	0.63	1.17	0.17	1.42	0.05	1.00	0.29	1.38	0.23	0.96
F	0.57	1.06	0.19	1.58	0.07	1.40	0.26	1.24	0.27	1.13
G	0.60	1.11	0.14	1.17	0.06	1.20	0.32	1.52	0.24	1.00
平均	0.56		0.15		0.05		0.25		0.24	

注：地形类别——A：平原，小的沟谷，平缓的山冈，相对高度差不超过30m；B：有高度50 m以上的高地对气流屏障的河谷；C：无屏障河谷；D：背风的高地；E：向风的高地，或大河的向风陡岸；F：高地，或相对高度超过50m的分水岭；G：半岛，开阔的海边。

(三)我国覆冰的概率分布

我国电力网架空线路设计，330 kV以下的采用15年一遇的最大冰厚值；更高压的线路或重冰区采用50年，150年以至500年一遇的极值计算或验算。验算情况下，导线在弧垂最低点的最大应力不宜超过瞬时破坏应力的60%。即使准备采取融冰措施的线路，设计冰厚也不能低于5年一遇的值。俄罗斯规定，不同电压的线路分别采用5,10,和15年一遇的覆冰值设计。

加拿大安大略水电局对 500 至 750 kV 线路按照 50 年一遇的覆冰极值设计。

由于覆冰的极大随机性，即使有 15 年正规观测资料，“15 年一遇”的值不能直接挑出一个极值，而应该通过“频率计算”求得。更长重现期的极值也只能进行频率计算求得。

我国对电线覆冰概率分布的研究甚少，原因是上世纪 80 年代覆冰研究出现一个高峰时，除高山站外没有长年代正规覆冰资料。利用当时仅有的较长年代的 6 个站（其中 5 个是高山站）的冰重资料，分别用几种分布试行拟合，并通过“ω^2-检验”比较其拟合优度。得到的结论是：五台山和南岳的冰重与极值第 I 型分布拟合得最好；庐山和金佛山则与极值第 II 型分布最为符合；峨眉山和奇台又和皮尔逊 III 型分布拟合最佳。这些结果，不能从地理上得到解释，不能得出电线覆冰概率分布的地带性规律。但此项研究结果正好说明，不能把一个地点覆冰的概率分布不加检验地使用到很远的地方。研究还指出：极值第 II 型分布尚能普遍地（尽管不是最好地）拟合上述 6 个地点的覆冰的概率分布。

国际电工委员会推荐极值第 I 型分布。他们以此项分布为基础，把指定重现期的冰重 P_T 表成

$$P_{\mathrm{T}} = P_{\mathrm{M}} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\mathrm{n}} \cdot K_{\mathrm{h}} \cdot K_{\varphi} \tag{4.4.13}$$

式中 P_{M} 是历年最大覆冰的平均值。K_σ 是覆冰的变差系数（标准差除以 P_{M}）和重现期 T 的函数，已制备图表可以查用。K_{n} 是反映观测年数的订正系数，已制备图表可以查用。K_{h} 是高度订正系数。K_φ 是电线直径订正系数。他们认为有 10 年以上资料便可利用此式求出 P_{T}。

捷克、加拿大也用极值第 I 型分布。用极值第 II 型分布的有前苏联和欧美一些国家。我国电力界推荐皮尔逊 III 型分布。

用绿葱坡、金佛山和峨嵋山各 30 余年的覆冰资料，分别按国际电工委员会方法（简称 IEC 法，有“计算”和“查图”两种具体做法）和皮尔逊 III 型分布（简称为 P-III 法）计算 50 年一遇的极值，进行对比。得出，如果原始资料年代不超过 15 年，IEC（查图）法的值和 P-III 法的值接近；IEC（计算）法的值比 P-III 法的值大。如果原始资料年代超过 15 年，IEC（查图）法的值比 P-III 法的值小；IEC（计算）法的值和 P-III 法的值接近。

在缺乏长年资料时，利用短期资料求取指定重现期极值的途径有二。

（1）用短重现期极值推求长重现期的极值。统计理论导出，极值第 II 型分布短重现期极值和长重现期极值有着确定的关系。此外，研究了一些经验关系，以极值第 I 型分布为基础，结合一些实际资料，求出“变差订正系数”和“观测年数订正系数”的计算式（或查算表）。如有 10 年以上的原始资料就可借此算出指定重现期的极值。曾对绿葱坡等几站长年资料，用皮尔逊-III 型分布拟合，并以此为基础，计算出短重现期的极值和指定重现期（15 年，30 年，50 年等）极值的“重现期订正系数”。

（2）寻求覆冰强度的替代参数。一种是建立覆冰强度（因变量）和雨凇时数及雨凇时的平均相对湿度（两个自变量）的复回归方程。一种是把连续覆冰日数乘以此期间的平均相对湿度，作为“覆冰强度特征值”，进行频率分析，求出了指定重现期的极值后，从历史资料中找出与此值相应的覆冰直径、厚度和冰重。类似做法是利用历年最长雨凇、雾凇日数作为样本，或用历年日平均温度低于 4 ℃的雨雪日数作样本，求取覆冰的概率分布。

以重现期作为设计的标准，是传统的做法，有它的根据。但是，根据指定重现期的极值设计线路，是否经济上最为合算？重现期是否最好的标准？有无其他更好的标准？这些是值得研究的。

四、电线覆冰的微气候特征

(一)覆冰强度随高度的变化

雨凇架的电线的高度离地 2 m。观冰站有几种高度的电线。架空线路高度一般为 15 m，高的不超过 30 m。须要把观测高度 Z_0 的冰厚 b_0 订正为设计电线高度 Z 的覆冰 b_Z。

我国学者 1959 年在前苏联学者导出的覆冰强度随高度变化的公式的基础上，提出较为普遍的公式，并由过冷却水滴随气流运动积聚在电线上的概念，列出冰厚随时间变化的微分方程，解出一定时间内冰厚形成的公式，再经验性地简化出冰厚为高度的幂函数：

$$b_Z/b_0 = (Z/Z_0)^A, \tag{4.4.14}$$

式中 A 是待定经验幂指数。

在 30 m 以下，风向和覆冰的增长时间几乎不随高度改变。积冰强度随高度的变化是由于风速、液态水含量和捕获系数等随高度改变而造成的。从雾凇覆冰的物理模型可知，高度 Z 上的冰厚 b_Z 与起始高度 Z_0(实测冰厚的高度)上的冰厚 b_0 的比(称为冰厚的高度订正系数)

$$K_{bZ} = b_Z/b_0 = W_Z E_Z V_Z / W_0 E_0 V_0 \tag{4.4.15}$$

K_{bZ}很难用解析式表示，即使有了解析式，有些自变量也没有观测值可供输入。所以，要把理论和统计分析结合起来解决这个问题。

风速和含水量随高度的变化遵从乘幂律，设其幂指数分别为 A_V 和 A_W。四川会东覆冰实验站的资料表明冰厚随高度变化遵从乘幂律。结合式(4.4.15)知，捕获系数随高度变化也近似地遵从乘幂律，其幂指数是 $A_E = A - A_V - A_W$。最后有

$$K_{bZ} = b_Z/b_0 = (Z/Z_0)^{A_E + A_V + A_W}. \tag{4.4.16}$$

这表明，冰厚随高度变化的幂指数由捕获系数、水分含量和风速三者随高度变化的幂指数组成。因为有丰富的风速梯度观测，A_V 不难确定。液态水含量极少梯度观测，A_W 很难确定。A_E 也无法从观测资料或理论上确定。为了实用的目的，要把幂指数 A 参数化，用常规观测的量表达。

这些幂指数与近地面湍流有密切关系。湍流强则上下层空气的交换强，气象要素的垂直梯度小，幂指数小。反之，湍流弱，则幂指数大。但是，湍流没有常规观测。估算大气稳定度的“巴斯奎尔法”指出，湍流强度与风速有正变关系。基于这一点，利用会东 4 整年的资料，求出雾凇覆冰的幂指数

$$A_F = 0.233\exp(-0.219V). \tag{4.4.17}$$

混合覆冰的幂指数

$$A_G = 0.358\exp(-0.175V). \tag{4.4.18}$$

此式表明，风速越大，湍流越强，覆冰的垂直梯度越小，则 A_F 和 A_G 都变小。会东覆冰时的平均风速是 4 m/s，算得 A_G=0.18。由此求出混合覆冰厚度(以 2 m 为起始高度)的高度订正系数 K_{bZ}，如表 4.4.6。

表 4.4.6 会东混合覆冰厚度的高度订正系数

高度 Z(m)	5	10	15	20
K_{bZ}	1.18	1.34	1.44	1.51

注：起始高度 Z_0 是 2m。

与小气候特征密切相连系的参数 A_F 和 A_G，和其他小气候的参数(如风随高度变化的幂指数)一样，可供小环境相似的地方参考使用。诚然，这些参数也有局地特征。在地面粗糙度不同的地方，上述一些参数会有一点差别。

国际电工委员会推荐的经验公式，雨凇的高度订正系数为 1，即不随高度变化。雾凇覆冰的高度订正系数

$$K_h = 0.749Z^{0.125}. \tag{4.4.19}$$

(二)风与电线的交角对覆冰的影响

讨论风向与电线覆冰的关系，要区别两种情况。第一，在较长的时间(如 2 天以上)风向有颇大的变化，可能代表性质不同的气流。气流性质的不同，必然使覆冰强度有差异。如昆明太华山东北方有滇池，偏北风时带来丰沛的水分，覆冰的厚度比偏南风时的冰厚大 5.28 倍。第二，在一段较短时间(如 1 天)内风向有微小变化，气流仍属一个气团，温、湿度和液态水含量没有多大变化，单纯由于风与电线的交角的改变，只会造成覆冰的少量差别。

从雾凇覆冰的物理模型已知，风与电线的交角越大，覆冰越严重。从会东雾凇覆冰资料得到，风与电线的交角大于 45°时的冰厚，比小于 45°时要大 4%～26 %。从湖北的资料得出，风与电线正交时的冰厚，大约比其他情况下要大 50%。掌握覆冰时的盛行风向，对于确定线路走向有帮助。

(三)电线直径对覆冰的影响

观测自直径 φ_0 的电线的冰重 P_0 要订正为设计的电线直径 φ 的冰重 P_φ。订正的系数称为冰重的电线直径订正系数 K_{P_φ}。由于覆冰重量是覆冰厚度的二次函数，冰重和冰厚的两个订正系数之间不存在线性关系。由雾凇覆冰的物理模型得出，冰重P(g/m)的电线直径订正系数

$$K_{P\varphi} = P_\varphi/P_0 = \varphi\beta_\varphi E_\varphi/\varphi_0\beta_0 E_0, \tag{4.4.20}$$

式中带下标 φ 的量是在直径为 φ 的设计电线上的量，带下标 0 的量是在观测电线(直径为 φ_0)上的量。

$K_{P\varphi}$与许多因素有非线性关系。理论研究指出，$K_{P\varphi}$随风速的增大和气温的升高而非线性地加大。在温度和风速固定的条件下，$K_{P\varphi}$先随着电线的加粗而加大，到电线直径超过一定值后$K_{P\varphi}$转而减小。设气温为－1 ℃，含水量为 0.15～0.20 g/m^3，φ_0＝5mm，表 4.4.7 提供了 $K_{P\varphi}$随电线直径和风速而变化的概量。

表 4.4.7　冰重的电线直径订正系数(起始直径 φ_0＝5mm)

风速(m/s)	设计电线直径 φ(mm)				
	10	20	40	80	100
4	1.6	1.9	2.0	1.0	0.9
8	2.3	3.2	4.8	2.8	2.7
12	2.4	3.2	5.2	5.2	5.2
16	2.5	3.7	6.1	7.7	8.9

表 4.4.7 表示出非线性、非单调的关系：在风速不大于 8 m/s 的情况下，若电线直径 $\varphi \leqslant$ 40 mm，较粗的电线比较细的电线覆冰重。直径 $\varphi>$40 mm 时，较粗的电线反比较细的电线覆冰轻。在风速＞8 m/s 的情况下，电线越粗，覆冰越重。

下面转到冰厚问题。从雾凇覆冰的物理模型可以推出，同一高度上不同直径的电线的冰厚

的比，即冰厚的电线直径订正系数 $K_{b\varphi}$ 等于两种直径对应的捕获系数之比。但是，这一比值不能用解析式表达，只能给定条件通过数值计算求取。设定风速和温度，则冰厚的的电线直径订正系数随着电线的加粗而减小。表 4.4.8 给出其轮廓。

表 4.4.8　冰厚的电线直径订正系数(起始直径 φ_0 = 10 mm)

气温 T(℃)		$-2 \leq T \leq -1$		$T < -2$	
风速 v(m/s)		$v \leq 10$	$v > 10$	$v \leq 10$	$v > 10$
电线直径(mm)	5	1.0	1.1	1.0	1.1
	20	0.9	1.1	0.9	1.0
	30	0.8	1.1	0.8	0.9
	50	0.5	0.8	0.5	0.7
	70	0.3	0.6	0.3	0.6

从上表看到，风速 $v > 10$(m/s)时温度差异对 $K_{b\varphi}$ 有一点影响。风速小于上述数值时温度对 $K_{b\varphi}$ 没有影响。通常可以不必考虑温度，只考虑不同风速下冰厚随电线直径的变化。从会东混合覆冰的资料求出以下经验公式：

$$K_{b\varphi} = b_\varphi / b_0 = 1 + Q(\log\varphi - 0.602), \qquad (4.4.21)$$

式中参数 Q 随风速的变化见表 4.4.9。

表 4.4.9　会东混合覆冰厚度的电线直径订正中的参数 Q

风速(m/s)	2	3	4	6	8
Q	−0.20	−0.77	−0.49	−0.15	−0.05

云南测得的雾凇覆冰厚度的电线直径订正系数如表 4.4.10。

表 4.4.10　云南雾凇冰厚的电线直径订正系数(起始直径是 10 mm)

电线直径(mm)	5	10	20	30	40
$K_{b\varphi}$	1.15	1.00	0.85	0.73	0.70

上表的结论是：电线越粗冰厚越薄。但是在个别情况下观测到，直径 9 mm 避雷线(不通电)上覆冰直径为 180 mm，直径为23.5 mm的较粗导线(通电)上覆冰的长径竟达 280 mm。这现象和理论结论不符。通电与否不能完全解释有这么大的差别。如果结冰时在现场有精细的观测，对这现象应该能够解释。德国有学者认为，只当过冷却水滴直径超过 25 μm，风速超过 25(m/s)时，冰重随电线直径的加粗而显著增大，否则，冰重和电线直径无明显关系。挪威有学者认为冰厚和电线直径无关。电线直径对覆冰密度也有影响。前苏联新比雅基哥尔斯克雨凇实验站测得的结果如表4.4.11。从表可见，电线越粗，覆冰密度越大。

表 4.4.11　前苏联测得不同直径的电线的覆冰密度

电线直径(mm)	10	15	20	25	30	34	38
覆冰密度对直径 5 mm 电线的密度比	1.13	1.25	1.32	1.37	1.43	1.53	1.60
观测次数	22	47	13	47	24	28	25

(四)档距长短和电线扭转对覆冰的影响

雾凇覆冰往往先在电线的迎风一侧形成。雨凇覆冰先在电线上面偏迎风一侧形成。它们产生转动力矩,使电线扭转,随之覆冰得以在电线上比较均匀地增长,覆冰长、短径差别不太大。覆冰同时扭转的电线迎着气流的截面积比不扭转电线为大,覆冰加快,冰重较大。设扭转和不扭转电线的冰重的比为 K_{PS}。据前苏联资料,在冰重不超过 600 g/m 时,K_{PS}随冰重增加而加大,如冰重超过该值,K_{PS}随冰重增加而减小。按推想,线夹附近的电线自由度小,扭转小,覆冰增长较慢,冰重较小;两档中间的电线自由度大,扭转大,覆冰增长较快,冰重较大。但日本有一次观测表明情况并不那样简单(表4.4.12)。

表 4.4.12　日本测得档内不同位置的覆冰情况

与杆塔距离(m)	66	30	20	10	5	0(杆塔)
覆冰的断面面积(cm^3)	30.2	25.0*	29.5	26.8	22.2	20.4
密度(g/cm^3)	0.50	0.64	0.67	0.74	0.81	0.83
冰重(kg/m)	1.50	1.60	2.00	2.00	1.80	1.80
冰重与杆塔处冰重之比	0.83	0.89	1.11	1.11	1.00	1.00

* 此值偏小,原文如此

这次观测资料表示,距离杆塔越远,覆冰截面积越大,显现电线扭转使冰厚增加。但是,距离杆塔越远,覆冰密度越小,可能是电线自由度较大,电线摆动,以致过冷却水滴冻结时包含较多气泡。上述两个因素的综合使得:随着对杆塔距离的增加,冰重先行增加,然后减小。

再考虑冰厚。设扭转和不扭转电线的冰厚比为 K_{bS}。前苏联的资料表示,当冰厚从 1 mm 增加到 7 mm,K_{bS}由 1 增加到 1.6。若冰厚继续增加到 15 mm,K_{bS}反而减小到 1.2。

观测发现长档距电线上的冰重比短档距电线的小。原因是长档距电线自由度较大,覆冰后容易扭转,受风吹动发生摆动或舞动,使黏附力较小的覆冰部分脱落。覆冰严重时(超过 5 kg/m),脱落现象更明显。分裂导线上冰重比单导线的小,原因是迎风面覆冰对背风面有屏蔽作用。

(五)通电导线对覆冰的影响

通电导线的冰重比不带电电线(如避雷线或雨凇架上的电线)大,因为电场能吸引雾滴。设通电和不通电的电线的冰重之比为 K_{Pe},在覆冰较轻时,K_{Pe}随冰重增加而加大,如覆冰超过 800 g/m,K_{Pe}随冰重增加而减小。K_{Pe}的值约在 1.25 至 1.40 之间。

(六)树林对覆冰的防护效能

树林削弱风速,减小了水滴的输送速率,能减轻覆冰。前苏联捷巴利采沃雨凇实验站对宽达 50 m,平均高度 8 m 的林带的防护效能进行了观察。线路高 4.25 m,在林带下风方向 4 m。令开阔地区电线覆冰的重量为 P_0,受林带屏障的电线覆冰的重量为 P_L,定义“防护效能”为

$$L = (P_0 - P_L) \times 100/P_0, \tag{4.4.22}$$

结果如表 4.4.13 。

表 4.4.13 林带对电线覆冰的防护效能 L

覆冰种类	风与林带交角(°)	冰 重(g/m)		防护效能 L(%)
		开阔地区	屏障地区	
雨凇	90	40	20	50
	60	130	90	31
	20	17	15	12
雾凇	90	120	30	75
	45	100	60	40
	0	57	55	4

可以看出,对雾凇的防护效能比对雨凇的要好,因为雾滴是由风水平输送的,而林木对水平的风有较好防护作用。林带与风的交角越大防护效能越好。

防护作用与林高 h 有关。在林带上风方向 25h 处开始有削弱覆冰的作用。从上风方向6h 处,到下风方向 20h 处,防护效能约 20%。防护作用最远可达下风方向 38h 处。

(七)电线覆冰荷载的计算

全面收集沿线常规的覆冰和其他气象资料,以及非正规的材料。掌握电线覆冰的研究文献。在对拟定的路线的气象情况有初步了解后,对拟取的路线进行踏勘,并对沿线的居民和有阅历的人员进行调查访问。踏勘应有气候专业人员参加,以便对任何一地段可能覆冰的情况作出估计。

要根据资料和踏勘情况选择最佳路径。尽量避开严重覆冰和大风的地段。例如,避免横跨垭口、风口、峡谷、山岭,不走湖泊、水库旁边,尽量在起伏平缓的地形、山脉的背风侧、树林的下风方向走线。不得已翻越山岭时,避免长档距、大高差。线路避免急剧转向。

计算覆冰荷载时,要综合考虑线路的安全可靠和节省投资这两个互相制约的方面,遵循设计规范,确定设计标准和安全系数,计算覆冰荷载。

计算覆冰荷载一般应包含以下内容。把观测的覆冰参数换算成均匀覆盖电线的覆冰厚度。把"起始高度"(观测高度)冰厚换算成规定的"基准高度"的冰厚(330 kV 及以下的线路基准高度取15 m;500 kV 的线路取 20 m)。把不同种类覆冰的厚度,换算成"统一密度"(0.9 g/cm^3)的厚度。或把原始冰厚结合密度换算成冰重。按标准推算指定重现期的冰厚极值。根据线路各具体地段小地形的微气候特征,对前述冰厚加以调整,得到当地的设计冰厚。把基准高度上的冰厚,订正到电线实际悬挂高度的冰厚。把基准电线直径的冰厚,经订正得到设计电线直径的冰厚。计算覆冰比载。对非常规资料,要细致分析才能加以利用。根据设计荷载,在工程上采取一定的措施来保证线路的安全。

五、风对线路的影响

(一)风荷载

大风是危害线路的另一种大气现象。1979 年我国 220 kV 送电线路被大风刮倒 5 次,少送电 6 800 万 kW·h。1980 年华北地区 220 kV 双回路输电线路在大风袭击下倒塔 8 基,倒杆 76 基,直接损失几百万元,间接损失难于估计。正确地估计大风,会创造可观的经济效益。杭州至新安江的双回路高压送电线路,后期设计风速比原定的减小 5 m/s,总投资节省了 50 万元,未

发生严重事故。

有些输电线路要跨越高山峡谷，那里的风向风速受局部地形影响变化很大。线路的设计风速如何确定，是一个难题。2003 年西北电力设计院为“满坪—兰州 750 kV 线路”设计而设立的风速专题研究，为解决这类问题提供了宝贵的经验。

该线路从起点到终点直线距离只有 130 km，但是经过黄土高原丘陵区，山丘重叠，沟壑纵横。谭冠日、李林和李卫林提出了解决问题的思路：在不大的范围内，造成风向风速局地差异的主要因子是海拔高度（以下简称高度）和地形。风速随高度变化的规律，用邻近若干气象站的“实测风速”V_{iA}及相应的高度 H_i拟合而得，是对数函数。那么，某站 V_{iA}和按对数律求得的“计算风速”V_{iC}的离差 R_i，就是该处地形对风速影响的后果。他们按照地形对风速加强或削弱的程度，赋予各类地形一个适当的“地形参数”。那么，各气象站 R_i和地形参数 T_i的关系，就反映地形对风速的影响。

赋予各类地形的参数值如下：屏蔽河谷或盆地（-3）；背风陡坡（-2）；背风缓坡（-1）；平坦、开阔地方（0）；迎风缓坡（1）；迎风陡坡或顺风河谷（2）；山顶或迎风喇叭口（3）；极度加强风速的地形（4）。

用各气象站资料建立该地区风速 V 随设计 H 和地形 T 变化的二元非线性回归方程。方程的复相关系数很高，显著性水平超过 0.01。欲求输电线路上任何一点的风速，可以将该地高度和地形参数代入方程求得。

1. 铁塔塔身的风荷载

铁塔塔身的风荷载一般分段计算，每一段不宜超过 10 m，同时假定风荷载作用于该段的重心。

铁塔塔身（包括立体横担和支架）单位面积上的风荷载是

$$W_T = C_X K_Z A_i F V^2 / 1600 \quad (\text{kPa}). \tag{4.4.23}$$

C_X 是风荷载的体形系数，反映塔身因不同形状和尺寸在受风时产生不同的动力作用所造成风荷载的差异，其数值由规程规定。

规程规定 330 kV 及以下电压的线路，基准高度为 15 m，重现期取 15 年。更高压的线路的基准高度为 20 m，重现期取 30 年。观测风速要用 K_Z（风荷载的高度订正系数）订正到要求高度（表4.4.14）。

表 4.4.14 风荷载的高度订正系数

高度 (m)	高度订正系数 K_Z		高度 (m)	高度订正系数 K_Z	
	35～330kV	500kV		35～330kV	500kV
15	1.00	1.00	80	1.60	1.47
20	1.09	1.00	90	1.65	1.52
30	1.23	1.13	100	1.70	1.56
40	1.34	1.23	150	1.90	1.75
50	1.42	1.30	200	2.07	1.90
60	1.49	1.37	250	2.20	2.02
70	1.55	1.42			

A_i 是考虑构件覆冰后面积增大的“风荷载增大系数”。如无准确资料，一般从 1.5 至 2.0 间取值。无冰时取 1。

F 是风振系数。风荷载是按“最大风速”(最大的 10 min 平均风速)计算的，是静力荷载。由于风的阵性，“极大风速”必超过“最大风速”，并对铁塔等构筑物施加动力荷载，瞬时会大于静力荷载。为了预防动力荷载对杆塔和对基础的破坏作用，把静力荷载乘上一个“风振系数”，或称“风压调整系数”(表 4.4.15)。

表 4.4.15　反映动力荷载的风振系数 F

线路电压 (kV)	计算杆塔时(km)		杆塔全高 $h(m)$	计算基础作用力时(km)	
	$h\leqslant30$	$30\leqslant h\leqslant50$	$h>50$	$h<50$	$h\geqslant50$
35～110	1.0	1.2	1.5	1.0	1.2
154～330	1.3	1.3	1.5	1.0	1.3
500	1.5	1.5	1.6	1.1	1.5

运用式(4.4.23)时关键是设计风速如何取值。首先从观测资料按表 4.4.13 的要求求出“基准风速”，包括用气象站风速资料推算出指定重现期的极值(常用的频率曲线是皮尔逊 III 型曲线和耿贝尔曲线)，再按风速随高度变化的规律(对数律或指数律)订正到“基准高度”。其次，针对线路各段地形和高度对风速进行修正后，代入式(4.4.23)求风荷载。

线路所经过的地形多种多样，在短距离内风速可能有差异。理论和经验证明，垭口，风口，狭管地形、水边、迎风坡、高地和山顶风速特别大。相反，开阔地形、低地、受屏蔽地形风速较小。根据气象站的风速估计特定地形下的风速，需要丰富的小气候知识和野外考察的经验。如果确认风与构件的交角是 θ，则风荷载应乘以 $\sin^2\theta$。偏于安全则把此项当作 1。若求塔身某一段所承受风的总荷载，将单位面积的风荷载 W_T 乘以塔身在风向垂直面上投影的面积。

国外线路的风荷载的计算，加拿大取 30 年一遇(10 min 平均)最大风速，美、英、日等取 50 年一遇的(瞬间)极大风速。粗略地估计，他们的风压取值大概比我们的大 30%，安全性颇高，投资自然较大。

通讯线和电气化铁道接触网的高度和气象站风标高度相差不多，直接取气象站风速资料不须作高度订正。

覆冰时和无冰时的风荷载有两点差异，即覆冰时的最大风速不同于一般最大风速，覆冰增大了线路的受风面积。我国大部分地区覆冰时的最大风速不超过 10 m/s，以往设计时取 10 m/s 已保安全。但是，河南 1972 年有一次覆冰时风速达到 8 级(17 m/s)以上，发生大量倒杆断线事故。

2. 电线的风荷载

电线总的风荷载(受风面上的总压力)是

$$W_X = (\eta\varphi_i L_P C_X K_Z v^2 \sin^2\theta)/16 \ , \qquad (4.4.24)$$

式中 φ_i 是电线阻截气流的直径，无冰时是电线的直径；覆冰时电线若不扭转，近似于覆冰短径；电线若扭转，近似于覆冰的等效直径。L_P 是档距。C_X 是电线的体形系数，按规程规定取值。K_Z 是风荷载的高度订正系数，根据电线的平均高度按表 4.4.14 取值。把风速 V 换算成风压，θ 是风和电线的交角。

由于空气中有湍流，在水平面上风速和风向是不均匀的，电线档内各段不会同时遇到最大风速。最大风速应乘上“风速不均匀系数”η(小于 1)才等于档内的平均风速。风速越大，η 值越小。η 值是凭精密观测求出的，由表 4.4.16 给出。

表 4.4.16 风速的不均匀系数

最大风速(m/s)	<20	20~30	30~35	>35
η	1.00	0.85	0.75	0.70

严格说，η 还与档距有关。档距越大，档内各处风速差别越大，η 值越小。

将 W_X 除以档距和电线的截面积便得比载。

(二)风偏

风使电线偏离平衡位置的最大角度为风偏角。如风偏角超过设计的角度，导线对地线或其他物体的间隙过小，可能发生闪络放电，烧坏线路，或造成单相瞬间接地事故或障碍。阵性的大风使导线反复接地，威胁线路的安全。电线的弧垂越大和风速越大，则风偏越大。弧垂又与温度和覆冰荷载有关。在设计时，需要局地大风、温度和覆冰 3 者组合出现以至引起最大风偏和最大弧垂的数据。

(三)次档距振荡

风从横向吹到并排的电线上，上风的电线对气流发生干扰，产生乱流，使下风的电线摇摆，是谓次档距振荡。振荡的轨迹是椭圆形，长轴接近水平。振幅 20~30 cm，频率每秒 1~5 次。覆冰的电线对气流发生干扰，更易出现次档距振荡。几条电线的振荡不同步会引起闪络。前苏联从大量观测中统计出容易发生次档距振荡的气象条件是：风与电线的交角大于 45°，风速 5~22 m/s；雨凇覆冰直径为 10 至 15 mm，雾凇覆冰直径为 25 至 70 mm，混合覆冰直径为 20 至 30 mm。

(四)微风振动

风速为 0.5 至 8 m/s 的风从横向吹来，与电线成 45°以上的交角，在电线的背风一侧不断地产生涡旋。涡旋快速地形成和消失，产生高频的脉冲式的冲击力，使电线在垂直方向颤动。若颤动的频率正好和电线(是个弹性系统)内在的某一个振动频率发生共振，就造成电线的微风振动。微风振动主要发生在单线，是驻波。长时间(每年 1 千至数千小时)的微风振动使线夹附近电线的金属疲劳，久而造成断股、断线，或使线夹和绑扎松动，或震坏金属具。

颤动的频率为：

$$f_V = K_R V_n / \varphi, \quad (4.4.25)$$

式中 K_R 是系数，与雷诺数有关，φ 是电线的直径，V_n 是垂直于电线的风分速，风速过大就不会引起颤动及微风振动。引起颤动的上限风速和档距有关：档距在 200 m 左右时，风速超过 4 m/s就不发生颤动；档距在 800 m 左右时，风速超过 8 m/s 才不发生颤动。

微风振动的频率大约每秒 5 至 50 次，波长大约 0.5~1 m。振幅一般小于电线的直径，大的可到电线直径的 2 至 3 倍。微风振动经常发生在以下地方：平坦开阔的地方，宽阔河流或谷地之上，离地高而拉力大的电线。

电线的静态应力越大，微风振动越剧烈。为控制静态应力，可采取防震措施，如安装防震锤。对广大地域运行 1~6 年的未加防震锤的线路调查，它们的平均运行应力大于瞬时破坏应力 18%的，检查约 10 000 个悬挂点，发现由于微风振动而断股的达检查点数的 22.2%。建造时加设了防震锤的，在同样的条件下运行，检查悬挂点 1 922 处，发现断股的只占 0.36%。微风振动时电线的应力与温度有关，但不敏感。用年平均温度为基础，略为调低一点，即作为微风时的平均温度。在不平坦的地上，或有树木和建筑物，气流受到扰动，反而不易发生微风振动。

覆冰电线的外表面不规则，风吹过时会产生不同方向的分力，加强了电线的振动。这种振动产生在风速不太大的情况下，不但有铅直方向的振动，还有环绕电线轴的振动，危害较大。前苏联的捷巴利采沃雨凇实验站观测到覆冰电线振动时的风，如表4.4.17。

由表可见，雾凇覆冰时发生振动比其他覆冰为多。不论是何种覆冰，电线的振动多发生在风从横向吹来而与电线有较大交角时，风速并不很大。

表 4.4.17　前苏联某地覆冰电线振动时风的状况

覆冰		风与电线的交角				风速	常见风速	
		0～22°	23～45°	46～67°	68～90°	范围	范围	频率
种类	频率(%)	频率(%)				(m/s)	(m/s)	(%)
雾凇	58	3	18	19	60	1～12	1～7	94
雨凇	17	5	5	23	67	3～18	5～12	78
混合覆冰	25	—	11	19	70	1～15	1～7	77

（五）舞动

阵风的涡旋会抬起电线，激发电线产生舞动。舞动易引起碰线，闪络，烧伤导、地线，跳闸，电线及杆塔构件疲劳损坏。

速度在 5～20 m/s 的风可以激发舞动。地面越不平坦，风和电线的交角越大，气层越不稳定，则舞动越强。电线覆冰时也会产生舞动。舞动的轨迹是椭圆形，长轴接近铅直。频率约每秒0.2～4 次；振幅 0.3～3 m，少数达 6～10 m。波长可达档距的 1/3 至 1/2。档距和弧垂越大，则振幅越大；电线越重，则振幅越小。

六、雷电对线路的影响

（一）雷电的危害

雷电对线路的影响，包括机械的、热力的和电磁的。

机械的作用：雷电击中线路，强大的电流产生巨大的热量，使电杆及设备中的水分瞬间汽化膨胀，形成爆炸，劈裂电杆，打坏设备，击坏基础。

热力的作用：雷电强大的电流产生高热，可能熔化电线，烧断角钢，烧坏材料和设备。

电磁的作用：闪电和打雷在线路上产生的感应电压可达几百千伏，雷电击中线路造成的电压降可能达到几百以至几千千伏。这种大气过电压能破坏绝缘，引起闪络，发生火花，直至燃烧，甚至击坏线路和电器设备。过电压可以通过电线传到变电站或发电厂，引起闪络，或破坏设备。雷电流若通过接地装置通到地面，造成接触电压或跨步电压，对人有危险。

（二）雷电的参数

要依据雷电参数设计防雷设施。绝大多数雷电参数（如雷的极性、雷云的电场、雷电流数值、雷电流最大的陡度等）要由专门实验站测定。气象资料只有雷暴日数，还可以统计出雷暴小时数。一个天文小时内有一次或多次雷暴，就算一个雷暴小时。

电线弧垂大和风偏大时，若遇雷电，电线之间或导线和其他物体的间隙小，容易发生闪络。弧垂和风偏受风速、覆冰和温度的影响。在设定电线和杆塔的间距时，需要雷电时的风速和温度的资料。雷电、风速和气温三者的组合多种多样，要细致整理气象资料才能得出最频繁的和影响最严重的组合。

（三）常规观测的雷暴资料的应用

落雷(雷暴着地,即云与地面之间的闪电)对线路非常危险,往往引起大气过电压。落雷次数是雷电频繁程度的重要指标。但是,常规气象资料没有准确的落雷观测,只有雷暴日数,或从“天气纪要”栏统计出雷暴小时数。利用这两项常规资料的途径是:由雷暴日数和雷暴小时数⇒每平方公里落雷的频度⇒线路遭受雷击的频度。

要将稠密观测点资料和气象站资料建立统计关系,才能利用气象站资料来推断附近地面落雷的空间分布和时间频度。我国目前取值是:每年雷暴日数不到40日的地区,地面落雷密度为0.015次/km^2·雷暴日。

落雷有很强的局地性和随机性。落雷的频度与对流天气系统的活动、地形、土壤电阻率等地方性特点有关。和雷暴日数相仿,雷暴小时数与落雷频度也有关系。在一定的区域内,可建立雷暴小时数和雷暴日数的统计关系,和它们和落雷频度的关系。

高度为 Z 的的线路遭受雷击的次数,大体上相当于沿线宽度为 8～10Z 的地面上受到的雷击次数。平原上一个雷暴日相当于100km线路遭受雷击0.06次。

(四)雷暴的局地性

雷电的宏观分布主要由对流天气系统的活动所决定。雷电在一个地区内的微观分布明显地受局部的地形、地质和土壤的影响。某些地形有激发和加强对流的作用,某些地质条件容易感应生电,某些土壤导电良好,使得有些地段容易落雷。从大量雷击记录得知,落雷往往发生在山区的条形盆地,“半岛”形的山头,地形陡峭的地方,水库、湖泊上空和周边地带,临江的山坡或山顶,地下水出口或露头处,地表裂缝,丛山中土壤潮湿区,多空隙岩石区,不同性质岩石的交错地带,不同地质年代岩石的交错地带,地质构造断层地带,地下有导电的矿脉或含矿岩石的地方,导电良好的地带等。线路避开雷击频繁的地区可以增加安全性。

七、气温对线路的影响

当档距超过某个临界值,电线在最大荷载时拉力最大,若档距不超过这个临界值,电线在气温最低时拉力最大。

电线的最大的弧垂发生在荷载最大时或气温最高时。电线的拉力和档距对弧垂也有影响。

“冰-风荷载”和温度造成电线过大的拉力和过大的弧垂,是杆塔、防震和绝缘配合的设计以及施工所需的数据。所需要的气象资料及其用途如表4.4.18所示。

表4.4.18 线路设计所需气温资料及其用途

气候资料	主要用途
最高气温,同时风速	计算最大弧垂
最低气温,同时综合比载	计算最大拉力,防震;检查绝缘子串上扬和电线上拔
年平均气温	计算微风振动时电线的应力
最冷月平均气温	电线和杆塔安装和检修时的初始条件
最大风速月份的平均气温	计算风荷载引起的电线拉力
最热月的平均最高气温	计算导线发热升温。导线的安全载流量允许电线的最高温度是70～80℃
最高水位时的气温	计算跨越河流的电线的弧垂

八、大气水分和大气污染对线路的影响

(一)雨、雪、覆冰、气压与电晕

当电线的表面电场强度超过空气的游离场强时,导线对周围空气放电,发生电晕,发出声

波和电磁波。其危害是：(1)损耗电能。在雨、雪或覆冰的天气，或在空气稀薄的高地，电晕更强，电力损失更大。(2)干扰无线电通讯，主要影响附近的无线电台。干扰的频带是150 kHz～300 kHz，干扰的程度与电晕放电的强度有关。雨天时干扰电平比晴天时要多 10～20 dB，最坏天气可增大约 20 dB。(3)有些地形上的线档电晕放电特别强，激起电线的舞动。低频和大幅度的舞动使金具磨损，线夹的销钉甚至被磨断。

电晕的起始场强与空气密度有密切关系。空气越稀薄，则电晕越经常，放电越强。在雨、雪、覆冰、阴天、有雾时，即空气特别潮湿时，电晕放电特别大。覆冰时导线表面凹凸不平，参差不齐，成为电晕的放电源。雨水或覆冰融化的水滴悬挂在导线上，也是电晕的放电源。下雪时，电晕损失和落到导线上的雪花多少成比例。雨、雪和有雾天气笼罩的线路越长，持续时间越久，则电晕耗电越大。如一条位于海拔 3 500 m 高地的 330 kV 的线路，用2×LG JQ－400导线，年平均电晕损失 4.32 kW/km。如全年晴好天气小时数占全年时间的 87%，电晕损失只占全年的 27.8%；如下雨、下雪和有雾小时数共占全年的 12.7%，电晕损失却占全年的 72.2%。

为了尽量减少电能的损耗，防止线路磨损和避免对通讯的影响，要求至少在良好天气下线路不发生全线电晕。设计时需选择适当直径的导线和合理的相、导线的结构，要分析线路经过地段的空气密度和天气情况对电晕耗电的影响，估计线路全年电晕耗电量。

天气对电晕耗电的影响可以定量估计。先通过实验决定不同长度的线路在不同天气下[分为雾天(包括露和霜)、冰雪天(包括下雪和电线覆冰)、好天(除以上几类天气外)]的电晕耗电，定出相应的计算常数，然后把各类天气下单位长度线路的平均电晕耗电，用 1 年内各类天气控制线路不同长度的小时数为权重，求加权平均，便得到线路的全年平均电晕耗电。

(二)大气污染和大气水分与污闪

杆塔上的绝缘子串和瓷柱积聚了污秽后，在特别潮湿的天气在工频运行电压下也会发生闪络，称为污闪。此时电压不特别高，开关自动重合闸不一定能成功运作，突然停电，造成的损失比较严重。在电网事故总数中，污闪事故仅次于雷害事故，但造成的损失却是雷害事故的 8～10 倍。污秽来自灰尘、大气中的盐分和工矿排放的大气污染物。污染的程度与线路和污染源的距离、风向和污染的排放量等有关。随着工业发展，大气污染加重，污闪有增加的趋势。防治大气污染的一般措施是高烟囱排放，但是，这只使污染物飘移得更远，大气中污染物的总量并没有减少。据不完全统计，我国1969～1979年的 10 年间发生污闪事故 1 483 次；1979～1987年的 8 年间发生污闪事故 1 463 次；1986～1987年的 2 年间发生污闪事故 577 次，直接损失电量 4 667 kW·h，间接损失无从统计。

引起污闪的天气是：(1)高湿、大雾、盐雾、结露、小雨和毛毛雨。它们使绝缘子表面的污秽的导电率增加，绝缘能力下降。先有漏电，闪烁(电弧现象)，直至闪络。甘肃省报告，绝缘子积污后，相对湿度超过 40%就容易发生污闪。中雨、大雨或雨滴的半径在数百微米以上的雨则可冲洗掉污秽，保持绝缘性。(2)大气层稳定，尤其是地面有逆温，大气污染物积聚在低层。此时的雾滴也是污浊的，容易发生污闪。

防止污闪事故的措施包括，使线路尽量避开现有重污染源，排放污染物的厂矿事先进行环境影响评价，采取防治污染设施，选择不影响附近环境和输电线路的地址，正确确定污秽的等级，并选择适当的绝缘子，给绝缘子涂上硅脂防潮，适时清扫，监测污闪的情况，包括安装泄漏电流记录仪，建立气象日志，记录污闪情况，决定清扫时间，进一步采取防止污闪的措施。

第五章 农业与气候

气候是进行农业生产的自然环境中最基本、最重要的条件之一。气候为农业生产提供了光、热、水、空气等能量和物质资源。一地的气候条件往往决定着该地的农业类型、种植制度、生产潜力、布局结构、发展远景以及农产品数量质量、树种分布、牧草、牲畜和鱼类分布等。

从农业的观点看，气候是一种重要的农业自然资源。一般把农业生产所能利用、开发的那一部分气候资源称为农业气候资源。农业气候资源包括太阳辐射、热量、水分、风等资源要素。分析和了解一地的农业气候资源状况，除需考虑温度、降水的月、年平均值等常规的气象要素统计量以外，还应结合农业生产对象的要求，具体考虑农作物生长期内的太阳辐射量、农作物进行光合作用的光合有效辐射量、生长季内的日照时数、一定界限温度(0 ℃、5 ℃、10 ℃、15 ℃、20 ℃)的初、终日，持续日数及其间累积温度、最热月平均温度、生长季长短、无霜期、降水量的季节分配、一定保证率下的降水量、不同季节和时段(包括作物全生育期或某关键期内)的农田蒸散量、水分盈亏、作物气候生产潜力等多种统计参数。

随着社会经济的迅速发展和科学技术的飞跃进步，人类对气候与农业生产关系的认识正逐步深入，对农业气候资源的开发利用要求也日渐提高，向着更深更高的层次发展。因此，广大农业气象工作者和农业生产者所面临的一个重要任务是认识气候规律，寻找农业与气候的关系，合理而充分利用农业气候资源，扬长避短，趋利避害，获得农业的最佳布局、最高产量和最优品质，建成高产、优质、高效农业，取得良好的社会效益，经济效益和生态效益。为此目的，有必要掌握我国农业气候的主要特征和分布规律，了解气候与农、林、牧、渔各业的关系，开展农业气候区划，制定各地开发利用农业气候资源、扬长避短的途径，使农业生产管理决策部门和广大农民群众能更科学、合理地安排管理农业生产，有力推动农业的可持续发展。本章将依次简要阐述有关内容。

第一节 中国农业气候的主要特征

一、农业气候类型多样

我国幅员辽阔，境内平原、丘陵、山区、高原交错。由于太阳辐射、下垫面和大气环流不同，各地光照、温度、降水分布千差万别，形成了从寒冷到炎热、从干燥到湿润等不同气候类型的复杂组合。在气候及土壤、生物等多种因素作用下，我国农业气候类型多样，农业景观迥然不同。

东部地区是我国的主要农区。其中南岭以南处于南亚热带和热带气候带，具有全国最优越的水热资源，四季常青。南岭以北至秦岭、淮河以南属中亚热带和北亚热带，雨量充沛，气候温暖。秦岭、淮河以北的华北平原和黄土高原东部属南温带，四季分明，光热资源较丰富，但降水年际变化大，旱涝频繁。东北大部分地区为中温带，冬季漫长而寒冷，夏季温和湿润，生长期较短，热量资源不很充分。

我国西北地区太阳辐射能资源丰富，冬季严寒而漫长，夏季热量条件好，降水稀少，气候干

燥。其中新疆的塔里木盆地、吐鲁番盆地和哈密盆地以及青海的柴达木盆地和内蒙古阿拉善盟属干旱南温带，新疆的其他地区以及甘肃北部、宁夏、内蒙古等地为干旱中温带气候。

青藏高原太阳辐射能资源丰富，但热量资源明显不足。水分资源由藏东南向藏西北减少，各地差异悬殊。整个高原地区，从热带、亚热带、温带到寒带，各类气候均可见到。

另外，由于山脉走向、海拔高低、地势起伏、地理位置以及离海远近等各种因素造成的光、热、水等气象要素的特殊分配，使得各地气候类型变得更加复杂多样。例如，金沙江河谷的巧家、华坪、元谋一带地处中亚热带，但独特的闭塞河谷地形，使非地带性影响超过地带性影响，气候炎热，长夏无冬，积温超过南亚热带的水平，与云南南部的西双版纳不相上下。

我国各地农业气候的多样性，要求人们在规划农业时应选择农、林、牧、副、渔各业的最佳气候生态类型，扬长避短，合理布局，将农业气候资源优势转化为农产品，提高农业气候资源的利用率，使农业生产朝着高产、优质、高效方向发展。

二、夏温偏高

我国夏季受巨大暖低压控制。炎热潮湿的热带空气随大陆低压前部和太平洋高压后部的偏南气流北上，使各地夏季气温比北半球同纬度地区要高。除青藏高原、滇中高原及高海拔山区外，全国其余地区最热月平均气温都在 20 ℃以上，东部季风区除东北外几乎都超过 25 ℃，最高达 30 ℃以上。

由于夏季气温较同纬度地区偏高，因此我国境内玉米、水稻、大豆等一年生喜温作物的种植北界比世界其他地区向北推移。例如，原产于热带高山地区的喜温作物玉米在我国可种到最热月气温高于 20 ℃，地处 47～49°N 的黑龙江绥化、嫩江地区。东部地区夏温高和充沛降水相结合，使农业具有明显的气候优势，喜温喜湿作物面积大，生长快，产量高，对我国的粮食生产起到至关重要的作用。

夏温高还有利于提高积温的有效性。因为积温本身包括温度强度和持续时间两个因素，有些地区总积温虽多，但夏季温度不高，限制了某些喜温作物的生长，在某种意义上说，积温利用率反不如夏温较高的地区。例如，棉花要求最热月气温在 23～25 ℃以上，否则不能现蕾开花吐絮。昆明四季如春，≥10 ℃积温4470.6 ℃，冬半年可种小麦、油菜、蚕豆等作物。但最热月气温只有19.8 ℃，日平均气温大于 18 ℃的持续日数也不到 30d，不能保证棉花正常成熟。同时，这里的夏温不足和秋季降温过早还限制了水稻的高产稳产。相反，石家庄≥10 ℃积温 4415 ℃，与昆明相似，但最热月气温为 26.6 ℃，年内有 5 个月的平均气温高于 20 ℃，喜温作物棉花、玉米生长良好。又如新疆准噶尔盆地的车排子、莫索湾位于 45°N 左右，≥10 ℃积温只有 3600 ℃左右，但棉花生产季内温度比同纬度其他地区高，最热月气温在 25 ℃以上，可种植陆地棉早熟品种，是我国棉花分布的最北界。若配合地膜覆盖技术，增产将更加显著。

夏温高与西北干旱地区日较差大和光照充足的优势相结合，更有助于提高温度的有效利用率。我国内蒙古西部、宁夏、河西走廊、新疆等干旱地区作物生长期内晴天多、辐射强、日照足，全年日照时数 3 000 h 以上，比华北地区多 300 h 以上；气温日较差大，≥10 ℃期间平均日较差为 12～15 ℃，吐鲁番盆地达 15～18 ℃，而东部平原一般为 10～12 ℃。在这些因素的共同作用下，作物生长发育加快，干物质积累的多，提高了温度的有效利用率。在有灌溉的地方，作物产量高，品质好。由于这一原因，西北地区农作物生长所需积温比东部平原地区相对偏少。如华北平原≥10 ℃积温 3600 ℃以上才有可能在麦收后种特早熟玉米，≥10 ℃积温 4200 ℃以上

的水分充足地区麦后早熟水稻仍感季节紧张。而宁夏银川平原南部≥10 ℃积温仅 3200 ℃,热量一年一季有余,两季稍嫌不足。但由于日照充足,夏温高,日较差大,对促进光合作用,增加干物质积累有利,如果作物搭配合理,随收随种,也可实现一年两熟。

当然,中温带和南温带地区尽管夏温较同纬度地区高,但冬季寒冷期较长,作物不能生长或冬作物处于越冬阶段,其间的太阳辐射能也无法利用。因此,冬冷是这些地区农业气候资源的限制因素。

三、雨热基本同季

温度是农作物能否正常生长、发育和成熟的先决条件,水分则是生长发育和产量形成的保证条件。在一定的光照条件下,若热量、水分二者适时配合,便会相得益彰,为农业生产创造优越的气候条件。

我国地处世界上最大的大陆,毗邻最大的海洋,因而季风气候非常显著。东部大部分地区在 1 年中降水量随温度的升高而逐渐增多,至最热季节时降水量达到高峰期。入秋后温度下降,降水也随之减少。这种雨热大体同步升降的特点,为我国的农业生产提供了极为良好的气候条件,它可使热量和水分在农作物的旺盛生长期内同时充分发挥作用,从而获得较多生物量。这是我国农业气候资源的一大明显优势。与东部季风气候大区相反,西北干旱区和青藏高寒区或降水稀少,或热量不足,致使雨热配合失调。

东部地区各地雨热同季的程度有所差异。

东北、华北地区雨热同季明显。4～9 月期间日平均温度≥0 ℃积温占全年≥0 ℃总积温的 80%～90%,夏季 6～8 月的≥10 ℃积温也占全年≥10 ℃总积温的 50%以上。同时,降雨多集中于夏半年(4～9 月),尤其是夏季(6～8 月)。4～9 月降水量占全年总降水量的 80%～90%,其中 6～8 月降水量即占年降水总量的 60%以上(表 5.1.1)。夏季中又以 7～8 月降水量为最多。此时正值东北、华北大部分地区玉米、大豆、棉花等作物孕穗、灌浆或块根膨大等关键生长期及南温带水果苹果、梨、葡萄等果实增长期,对水分和热量要求较高。充沛的雨水配之以较高温度,加之光照充足,对作物迅速生长十分有利。另外,6～8 月降水还可为华北冬小麦提供必要的底墒。但是,东北、华北地区受季风气候不稳定性的影响,汛期降水年际变化较大,或过于集中造成局地洪涝;或雨水过少导致伏旱或伏秋旱,对玉米等秋作物生长不利。

表 5.1.1　6～8 月≥10 ℃积温与降水量占全年总量的比值(1951～1980)

地点	积温比	降水比	差值	地点	积温比	降水比	差值
哈尔滨	0.62	0.64	−0.02	上海	0.43	0.37	0.06
齐齐哈尔	0.66	0.70	−0.04	合肥	0.46	0.40	0.06
长春	0.60	0.68	−0.08	杭州	0.44	0.33	0.11
沈阳	0.54	0.62	−0.08	武汉	0.43	0.40	0.03
锦州	0.53	0.67	−0.14	长沙	0.41	0.30	0.11
北京	0.50	0.75	−0.25	南昌	0.40	0.33	0.07
石家庄	0.46	0.65	−0.19	福州	0.34	0.37	0.03
太原	0.52	0.60	−0.08	南宁	0.30	0.49	0.19
济南	0.46	0.65	−0.19	广州	0.30	0.43	0.13

（续表）

地点	积温比	降水比	差值	地点	积温比	降水比	差值
郑州	0.45	0.53	−0.08	海口	0.26	0.40	0.14
呼和浩特	0.55	0.66	−0.11	重庆	0.40	0.40	0.0
西安	0.48	0.38	0.10	成都	0.41	0.61	−0.20
兰州	0.52	0.55	−0.03	贵阳	0.41	0.45	−0.04
银川	0.55	0.59	−0.04	昆明	0.35	0.59	−0.24
酒泉	0.59	0.57	0.02	景洪	0.25	0.55	−0.30
和田	0.46	0.51	−0.05	西宁	0.66	0.57	0.09
乌鲁木齐	0.57	0.30	0.27	格尔木	0.65	0.61	0.04
伊宁	0.55	0.25	0.30	拉萨	0.57	0.78	−0.21

江淮及以南地区4～9月≥10℃积温占全年总量的70%左右，6～8月≥10℃积温占全年的30%～40%（表5.1.1），不如北方那么集中。降水的季节分配也较均匀，4～9月降水量占全年总降水量的70%。从四季看，6～8月和3～5月各占全年的30%～40%左右，9～11月占全年10%～20%左右。其中华南地区纬度偏低，暖季时间更长一些，初秋又多热带气旋活动，因此4～9月、6～8月的积温比例相对较小，而降水比例则较积温稍大。尽管南方各地雨热集中程度不如北方那么显著，但由于热量大，降水充沛，雨热同季时间较长，因此，复种指数高，喜温作物种植面积大，农作物产量高，农业生产潜力大，为多熟种植以及各种亚热带经济林木生长提供了极有利的条件。但江南4～6月雨水往往偏多，并伴随低温寡照，引起早稻烂秧和僵苗不发；7～8月又易出现伏旱少雨高温天气，使双季早稻发生高温逼熟，对中、晚稻也有不利影响。

西南云贵高原纬度低，海拔高，温度、降水分布特点与东部地区有很大差别。气温变化较平缓，春、秋温度较低，夏季温凉，冬无严寒。云贵高原中西部受西南季风影响，干、湿季分明，湿季降水占全年的80%～90%；干季只占全年的10%～15%，河谷地区仅占5%～8%。干季后期温度接近全年最高值而降水为全年最低值，水分严重不足。特别是雨季开始晚的年份，春、夏连旱十分严重。

四、农业气候变率大

我国气候也有不利于农业的方面，如年际间季风的进退迟早、强弱、影响范围不同，常造成各地温度、降水的年际变化很大，致使农业气候资源不够稳定，其中以水分资源尤为突出。

我国各地年际降水量的差异十分明显。这种变率比欧洲大得多，比北美洲也大些。南方多雨区最多雨年和最少雨年的比值一般为1.5～2.0倍，而北方少雨区为3～4倍，最多可达4～5倍。其中以黄淮海地区和西北内陆地区降水量的年际变化幅度最大，甚至有高达8～10倍的地区。

鉴于降水年际变化较大，农业上常考虑一定保证率（多用80%）下的降水分布。全国80%保证率下的年降水量分布趋势与多年平均基本一致。80%保证率的年降水量约占多年平均的70%～90%，变率越大的地区，所占比例越小。全国东部地区以黄淮流域最小，仅占60%～70%左右。东北地区、长江中下游地区占80%左右，江南大部分地区占80%～90%。云贵高原降水量最可靠，80%保证率下的降水量占多年平均的85%～90%。西北内陆地区降水少，年际

变化大，降水保证程度差，80%保证率下的降水量一般都不到多年平均降水量的70%。

与降水相比，温度相对稳定一些。但各年冬、夏季风的强度及相应的大气环流特点不尽相同，所以各地温度同样存在较大的年际差异。例如黑龙江漠河1951～1980年30年中≥0℃积温的最少年份为1121.1℃，最多年份达1897.1℃，相差775.6℃，占多年平均值的47%，华南地区温度高，积温多，年际变化较小，极差只占多年平均的5%左右。但这里冬季极端最低温度的年际变化对多年生热带经济作物有较大影响，一旦出现较强降温，会造成严重冻害。1954年底至1955年初的冬季，寒潮影响抵达海南岛，儋县最低温度降到0.4℃，比多年平均值(5.9℃)低5.5℃，比历史最高值低7.9℃。

分析各地积温变率的分布可以看出，华南大部分地区≥0℃积温比较稳定，变率值不到1.5%；东北、华北北部、黄土高原和新疆北部等地≥3%，青藏高原最大，约占4%～5%。≥10℃积温的变率比≥0℃积温略大。雷州半岛以南、云南西双版纳、元江河谷等地≥10℃积温变率在2%以下，其余东部地区大多在2.5%～4.0%之间，其中以杭嘉湖平原至鄱阳湖平原一带最稳定，小于2.5%。东北、内蒙大部、黄土高原、新疆北部大于4%；青藏高原≥10℃积温比≥0℃积温不稳定得多，变率高达10%。上述分析表明，在热量条件不很充分的北方(尤其是东北地区)，温度年际变化较大，农业生产的风险更大一些。例如黑龙江≥10℃积温比平均值减小100℃以上时，每减少100℃，可使粮食产量减少10%左右。

此外，受季风气候影响，春季升温、秋季降温的迟早和速度也对农业生产有直接影响，是构成一些地区热量资源不够稳定的因素。春季南方云雨较多，天气多变，增温较慢，常造成水稻烂种烂秧，三麦遭受湿害。9月中下旬至10月上旬是南方双季晚稻的孕穗、开花期，对温度很敏感。北方较强冷空气南下时会使一些地区水稻遭受寒露风危害。据分析，长江中下游和华南地区10 a中约有3～5a出现寒露风灾害。另外，冬季风强的年份秋季降温迅速，秋霜过早来临，使东北地区和华北北部地区大秋作物遭受霜冻危害，引起减产。

由于我国气候变率大，农业气候资源不很稳定，人类目前又不大可能大范围改变温度、降水条件。因此，在利用农业气候资源规划农业时，要充分认识到这一特点，因地制宜，扬长避短，把农业生产建立在稳定可靠的基础上。

五、气象灾害频繁

我国冬、夏季风进退时间早晚及强弱程度的不同常造成水、热条件在时间、空间分布上的不稳定，致使旱、涝、风、冻、雹、热害、低温冷害等农业气象灾害发生频繁，限制了光、热、水气候资源的利用，更给农业生产带来严重损失。

气象灾害的种类很多。因温度引起的有低温冷害、霜冻、冻害、热带作物寒害以及热害(高温逼熟、灼伤)；因降水多少引起的有旱灾、湿害、洪涝、雪灾、雹灾；此外还有大风、干热风、暴风雪等。从灾害种类上看，对我国农业影响最大的灾害主要是干旱、洪涝和低温灾害。从地区上看，受气象灾害影响而减产最多的地区是黄淮海地区和长江中下游地区，其次是东北、西南、中南和西北。

(一)干旱

干旱是我国农业生产中最严重的一种农业气象灾害。1949年以来平均每年遭受旱灾的耕地面积占受灾耕地总面积的62%。每年自然灾害影响的粮食减产中因干旱影响而引起的约占50%。

从干旱发生的地区分布来看，黄淮海地区受旱面积和成灾面积占全国总数50%左右，长江中下游地区占20%左右，东北、西南地区各占10%，华南、西北分别为5%。根据干旱出现的季节，可分为春旱、夏旱、秋旱和冬旱。

1. 春旱

华北、西北和东北春季温度回升快，太阳辐射强，空气干燥，降水稀少，一旦长时间无雨或雨量明显偏少，便很容易出现春旱。其中以黄淮海地区最为严重，发生机率约70%左右，影响小麦返青后生长，特别是使处于拔节、抽穗和灌浆初期等缺水敏感阶段的小麦穗数、穗粒数减少，千粒重降低，严重影响产量。同时，春旱还使春播作物的播种、出苗和生长受阻。雨季来临较迟的年份在初夏时节水分亏缺达到最严重，发生初夏旱或春夏连旱，影响夏播。据统计，黄淮海地区因初夏旱影响适时夏播的机率为40%～65%。

2. 伏旱

长江中下游至两广北部的伏旱十分常见，湖南、湖北、江西、浙江西部尤为突出。伏旱一般出现在7月上旬至8月。由于受副热带高压控制，天气晴热，降水很少，加之台风偏少，造成降水蒸发差很大，严重影响中稻开花、灌浆和晚稻的移栽、苗期生长。北方三伏期间干旱导致棉花蕾铃脱落，玉米秃尖、缺粒，还可能影响翌年小麦产量。

3. 秋旱

北方、南方都可能发生。华北秋旱对秋作物影响不大，但对冬小麦播种、出苗不利。长江中下游地区的秋旱主要发生在湖南、湖北、江西、安徽等省，直接影响晚稻灌浆，造成减产。

4. 冬旱

主要发生在华南。华南地区1月降水变化率很大，一旦降水偏少，会对那些仍在生长，需水较多的作物产生很大影响。另外，我国北部和西北部牧区冬季少雪会出现“黑灾”，使牲畜吃不上雪水，严重掉膘。

(二)洪涝

洪涝可分为洪水、涝害和湿害3种。洪水指大雨、暴雨引起山洪暴发，河水泛滥，淹没农田，毁坏房屋。涝害指降水过猛造成农田积水过多，对作物构成威胁。湿害指连阴雨时间过长，土壤过湿，作物根系因缺氧而受伤。

不同季节发生的洪涝灾害类型不同。春季江淮地区多连阴雨，常发生大范围湿害，对小麦、大麦和元麦影响很大。华南有的年份发生洪水，夏季各地均以洪水灾害为主。秋季涝害较少，南方棉花成熟初期持续连阴雨会发生土壤过湿，轻者烂桃烂铃，重者早衰死亡。江淮小麦秋播时雨水过多可造成烂耕烂种。

从地区上看，华南地区涝灾的可能发生时期最长，以夏涝最多；长江中下游6月为梅雨主汛时期，受涝最多；江淮地区春季和秋季湿害时有发生；黄淮海地区夏季多发生涝灾；东北地区涝灾集中于7、8两月。

(三)低温

低温危害包括冷害、霜冻和冻害，因低温发生时段和强度而异。

1. 冷害

冷害指农作物生育期内气温偏低引起的生育期推迟或生殖器官机能受到损害而造成农业减产。

东北地区玉米、高粱、大豆等作物主要发生延迟型冷害，因热量不足造成作物生长不良，发

育期推迟，进而使籽粒不饱满、成熟度低。东北地区1951～1980年出现过8次较强的低温冷害年，对农业生产造成巨大损失。其中最严重的1969、1972和1976年3年平均减产达58×10^8 kg。东北粮豆产区延迟型冷害平均3～4年发生1次，大小兴安岭、长白山区约2年一遇。水稻常发生障碍型冷害或延迟型和障碍型的混合型冷害。营养生长期内的低温引起延迟型冷害；对低温敏感的生殖生长期内短时低温使水稻不孕，产生空壳和秕谷。混合型冷害因连续发生冷害，可造成农业大幅度减产。辽宁及吉林西部较少发生障碍型冷害，出现频率不到20%；而长白山地、大小兴安岭、内蒙古东部频率最高，可达60%。

南方双季晚稻抽穗开花期(9、10月)正值季节变化，不时有冷空气南下，明显降温，对水稻安全齐穗构成威胁，严重时会影响开花、授粉的正常进行，使空秕率增加，产量降低。通常以晚稻抽穗开花期间日平均气温连续3 d或3 d以上<20 ℃作为粳稻低温指标；日平均气温连续3 d或以上<22 ℃作为籼稻、杂交稻低温指标。据分析，南方秋季低温的出现日期基本上自高纬度向低纬度、从内陆向沿海逐步推迟，丘陵山区自低海拔向高海拔明显提早。

2. 霜冻

指植物生长季内植株冠层附近气温短时降至0 ℃以下，使植物体内水分冻结而造成的伤害。轻者使植物生长缓慢，植株矮小；重者叶、茎干枯变白，以至冻死。霜冻的危害程度除取决于降温强度外，还与作物种类、发育阶段、气温回升速率等因素有关。我国中纬度地区常有秋霜和春霜。秋霜危害尚未成熟的秋收作物和未收获的蔬菜。春霜影响越冬后返青的作物、开花的果树以及春播作物的幼苗。华南和四川盆地冬季偶有霜冻，危害冬季仍在生长的作物。

3. 冻害

指冬作物、果树及牲畜在越冬期内因遇0 ℃以下或长期在0 ℃以下引起植株冰冻或丧失生理活力造成死亡的现象。我国冻害发生最多的地区是北方和长江中下游地区。北方冬麦区可因秋旱、降雪少、冷空气活动强降温而造成冬小麦受冻死亡。长江中下游地区虽属亚热带地区，但有冬小麦、油菜等越冬作物及抗寒能力较弱的热带、亚热带经济作物生长，加之丘陵山地对冷空气的阻挡，常使冻害持续时间较长，并伴有降雪、冻雨，导致越冬作物和经济林木遭受严重冻害。

受冻害影响最大的作物是冬小麦和柑桔树。

冬小麦冻害指秋末至初春小麦越冬期间的0 ℃以下低温使麦苗受伤害或死亡的现象。冻害程度不仅取决于冷空气强度和持续时间，还与小麦品种、受冻部位，以及耕作技术、田间管理、土壤性质有关。我国冬小麦的严重冻害区为辽南、晋、陕北、宁夏南部、河西走廊等地，严重冻害年4～5年一遇，部分地区3年一遇。重冻害区为津、冀北、陕西中部、陇东、新疆伊宁等地区，严重冻害年5～6年一遇。北方冬小麦冻害发生年往往是严寒和干燥少雪同时发生，因而死苗严重。

柑桔对温度反应敏感。冬季强大寒潮南下时我国亚热带地区气温可急剧降至0 ℃以下或更低，导致柑桔树体伤害以至死亡。我国亚热带大部分地区柑桔都有冻害威胁。西部四川盆地和东部沿海地区相对为暖区；中部江汉平原、洞庭湖平原因南岭山脉对冷空气的阻挡，柑桔冻害最重；东部地势平坦，寒潮过境迅速，因而冻害相对较轻。一般常用极端最低温度－5 ℃、－7℃、－9 ℃、－11 ℃作为柑桔冻害程度的指标。根据我国亚热带地区柑桔冻害区划的分析，由江苏东台经武进、南京、六安、麻城、房县、西峡向西北一线以北的亚热带地区≤－5 ℃低温出现频率为100%，≤－11 ℃频率为20%～60%，是柑桔冻害最严重的地区，不适宜柑桔栽

培。浙东南、湘西南、宜昌、恩施、汉中盆地、武都等地为轻冻害区。浙江东部沿海和四川盆地为无冻害区，最适宜柑桔栽培。

第二节 种植业、林业、畜牧业、水产业与气候

一、种植业与气候

种植业与气候的关系主要表现于两个方面，其一为作物种植与气候的关系，如作物分布状况、产量高低及品质优劣与气候的关系等。其二为种植制度与气候的关系，如种植结构、熟制、种植类型等。

(一)作物合理布局与气候

各种作物在世界上的分布区域范围差别很大。形成这些差异的因素中，气候因素、地形土壤因素、生物因素等环境因素是十分重要的。其中气候因素对作物的分布影响最大。作物通过对其原产地气候的逐渐适应，通过人工培育、选择，增强其对气候适应性的广泛性，不断向与原产地和已适应地点农业气候相似的地区更加广泛地扩展，逐渐形成了一定的分布格局。因此，各种作物分布的范围，在很大程度上受它所需的气候条件及其与各地季节的吻合性而定。其中光照、温度和水分条件起到了关键作用。

1. 作物气候适应性

我国主要粮棉作物要求的气候条件及分布区域：

(1)冬小麦可适应的气候条件是全生长期总积温(≥0 ℃)为1 800～2 400 ℃(或全年积温在 2900 ℃以上，而青藏高原可少到 1600 ℃)，需水量通常为 500 mm 以上。越冬期间，月平均最低气温不能低于－15 ℃，或极端最低气温不低于－24 ℃。高于 24 ℃的日平均气温，不利籽粒灌浆，并将促使其成熟。

冬小麦由于气候条件的限制，栽培北界在最冷月平均最低气温－6～－8 ℃、极端最低气温－22～－24 ℃一线(有稳定积雪地区，可低到－26～－30 ℃)，但积雪达 5～8cm 而持续时期不能超过 5 个月。我国冬小麦的北界大致在长城附近，即辽南、冀北、晋北、陕北、甘肃中部一线。在垂直方向上，小麦可从海平面一直分布到 4 000 m 以上的高原。海拔高度为 4 040 m 的西藏江孜附近，是中国冬小麦种植的上限。

在我国，冬小麦主要分布于暖温带气候的黄淮海平原和亚热带北部的长江流域。

(2)玉米适宜生长的气候条件是：全年活动积温(≥10 ℃)在2 000 ℃以上，最热月平均气温在 18 ℃以上。年降水量600～800 mm，在玉米生育期间，每月降水量宜 100 mm 左右。生育期间降水量＜350 mm 不宜种植。抽雄期后有高温的地区，此时宜有 200 mm 以上的降水。成熟期气温应小于 25 ℃。我国农业区几乎都有玉米种植。主要种植带在东北松辽平原、华北平原和西南的云贵川一带。

(3)水稻所需的气候条件：年活动积温(≥10 ℃)在 2 000 ℃以上，全年日平均气温大于 10 ℃的持续天数稳定在 110 d 以上，日平均气温高于 18 ℃的天数大于 30d，年降水量大于 800 mm，或有灌溉条件的地区，都适宜水稻种植。

水稻是我国首位粮食作物，种植范围广阔。约 90%的稻田集中于秦岭、淮河以南的地区。

(4)棉花喜光、热，能适应热带到温带、季风气候到沙漠气候(需灌溉)等多种气候条件。目

前世界上栽培较广的陆地棉，需年总积温(≥15 ℃)2 600～5 500 ℃(或≥10 ℃的积温 3 300～6 000 ℃左右)，开花期要求平均气温 23 ℃以上，无霜期 150～300 d 之间，生育期间降水量在 450～7 50 mm，日照较长的气候条件。我国黄淮海地区、长江中下游地区和新疆都种有陆地棉。另外，我国新疆吐鲁番盆地还有部分适应热带干旱、半干旱气候的纤维细长的海岛棉。

2. 作物产量与气候

作物生产的最基本的活动是进行光合作用。作物产量的形成即为光合作用积累干物质的结果。获得高产，首先要有对光合作用速率影响很大的太阳辐射、温度和水分条件。还要有在适宜气候条件内的较长的大田生长期。在影响作物产量的气候因子中，降水量的年际变化很大，常形成作物生长期内的干旱和水涝灾害，导致减产欠收。另外，低温霜冻、夏季低温、高温逼熟等可能会缩短作物生长期，从而降低作物产量。

3. 作物品质与气候

气候条件同样是影响农作物产品品质优劣的环境因子之一。例如湿润多雨气候有利于油料作物油脂含量提高；大豆鼓荚期较高的温度(不超过 35 ℃)可提高大豆籽粒含油率；油菜适宜生长在凉爽湿润、温度日较差大、生育期长的气候条件。大陆性气候下小麦籽粒蛋白质含量高，所以我国气候干燥、大陆性强的西北地区小麦品质较好，而江南、西藏河谷、四川盆地小麦蛋白质含量较低，品质较差。雨水充沛的湿润气候或有充分水源灌溉条件的地区，通常可获得含有高糖分的甘蔗、甜菜，高质量的棉麻及淀粉含量较多的薯类作物。

综上所述，农作物对光照、温度、水分有各自不同的要求。只有尊重客观规律，从作物的气候适应性出发，选择适宜的地区，种植适宜的作物和品种，才有可能获得高而稳定的产量、优良的品质。从我国的主要农作物种植布局情况看，有一些问题应特别引起注意。

小麦是我国第二大作物，在我国北方冷凉地区及亚热带、暖温带的低温季节广为种植。据研究，我国小麦蛋白质含量自北向南随降水量和相对湿度的递增而呈逐渐减少的趋势。因此，长江以南地区应适当减少小麦种植面积，适当扩种比较耐湿且收获期较早的油菜。长江以北至黄河以南地区光温水配合较好，特别是小麦生育期内降水量基本可满足生长需要，应适当扩大小麦种植面积。而黄河以北的京、津、冀东南、鲁北地区水分亏缺十分严重，限制了小麦种植面积的扩大和产量的提高。除改善灌溉条件外，还应采取一定的农业措施以提高农业气候资源利用率。如在降水集中的夏季深耕蓄水，使伏雨秋用；又如增施肥料，以肥调水，提高水分利用率。

中国棉区广阔，北起辽宁南部和新疆准噶尔盆地南缘，南至海南岛；东部的沿海湿润气候区到西北内陆干旱气候区，都有棉花分布。综合起来看，黄淮平原自然生态条件兼有南北之长，为棉花最适宜气候区，可将棉田适当集中，棉粮套种；黄河流域的豫北、豫东、鲁西、冀中、冀南、晋南及长江中游、江汉平原、长江三角洲等地可建立陆地棉生产基地；新疆棉区是早熟和中熟的海岛棉基地；冀北、辽西、鲁东南、江苏东北部及浙江、两广北部、四川等地为棉花次适宜气候区，应逐步压缩植棉面积。

柑桔在我国南方分布较广，但不同气候条件的地区柑桔产量和品质都不同。浙东南、赣南、湘南、闽东南、台湾中北部、两广大部、云南南部、贵州南部部分地区、四川盆地、长江三峡为柑桔栽培最适宜区，盛产甜橙和宽皮柑桔；浙东沿海和南部山区、闽西北、赣湘中南部、黔东、滇北、鄂西南、四川盆地周围及两广沿海、云南元江下游、台湾东西沿海地区为适宜区，栽培宽皮柑桔，部分地区可发展甜橙；上海、太湖以东、浙中北、赣湘黔三省北部、皖西南、陕南、陇南及台湾南部、雷州半岛、海南岛为次适宜区，其中北部的长江中下游地区应选择良好的气候区域，种

植耐寒的宽皮柑桔，并采取必要的防冻措施，台湾南部、雷州半岛等地品质较差，只可作为自给性生产；苏南、皖南、浙西北、豫西南、湖北等地必须选择特殊的小气候环境，才能种植耐寒早熟的温州蜜柑等品种，并需采取严格的防寒防冻措施。

另外，积温多少和生长期长短是确定作物种类和品种种植北界（包括高度）的主要依据。而冬季的严寒程度、作物最大限度所能忍受的最低温度往往是限制大田越冬作物和多年生果木、经济林木的分布及产量、品质的重要因素。如果不考虑越冬条件，盲目扩种，越区种植，不仅产量低，品质差，还会发生严重冻害，造成重大损失。冬小麦的最低越冬温度一般为平均极端最低气温－22～－24 ℃，温度过低便会受冻（有稳定积雪覆盖除外）。东部柑桔栽培北缘地区要根据柑桔的耐寒性及各地柑桔越冬的温度条件，考虑能否安全越冬，能否取得最佳经济效益。我国橡胶种植区为热带、南亚热带季风气候，气象灾害较多，尤其是越冬期间的寒潮和夏、秋季节的台风影响较大。加上橡胶从幼苗到割胶需要6～8a时间，因此在确定植胶北界时要把寒害和风害机率及取得生产效益的周期结合起来考虑，使植胶更加安全，更有生产意义。

（二）种植制度与气候

种植制度是指包括农作物组成、熟制、种植类型和方式在内的一整套农业生产体系。熟制指 1a 内能种几茬及各茬作物的搭配，它是种植制度的核心，涉及气候、土壤、地貌、人口、作物种类、水肥条件、生活习惯以及社会经济等诸多因素。

1. 一个地区一年之内能种几季，基本取决于该地区热量累积值是否能满足作物全生育期的需要。我国从北向南热量逐渐增多，作物从一年一熟到两熟、三熟。大体上以 0 ℃以上积温小于4 000 ℃为一年一熟区，4 000～4 200 ℃为以冬小麦为前茬的两年三熟区的北界，5 500 ℃为稻麦两熟适宜区和双季稻可能种植的北界，5 900～6 100 ℃是稻、油（麦、绿肥）三熟制的安全北界，8 200 ℃是双季稻加喜温冬作物的一年三熟安全种植北界。

2. 各种熟制成功与否，还要看是否有充足的水分供应、一定的土壤养分以及合理的技术管理。其中降水量的多寡直接造成熟制和作物搭配的地区差别。一般说来，在热量保证的条件下，年降水量小于 600 mm 的地区只能一年一熟或两年三熟，而大于 800 mm 才能有可能稻、麦两熟。例如黄淮平原 0 ℃以上积温大于 5 000 ℃的地区中只有年降水量大于 800 mm 的苏北地区才能稻、麦两熟，其他地区如豫东南、鲁西南等地因降水不足而只能小麦、玉米一年两熟。

3. 气象灾害常常限制种植制度的发展，其中以干旱和秋、冬季低温为主。冬小麦喜冷凉，种植冬小麦并与喜温作物搭配可以充分利用温暖地区一年中低温季节的气候资源，实现多熟种植。但极端最低气温多年平均值低于－22 ℃的严寒地区冬小麦不能安全越冬，无法实现以冬小麦为前茬的两年三熟制。华北平原黄河以北地区春季降水稀少，干旱频繁，凡没有灌溉条件的地区均不能形成以冬麦为主的复种类型。又如四川盆地热量资源丰富，冬季温和，夏季炎热，≥0 ℃积温相当或略大于长江中下游地区，但由于秋季降温早，低温阴雨，造成双季晚稻空壳率高，因此，种植制度只能以小麦、中稻两熟和早稻三熟为主。

全国熟制气候区划，本着既考虑现状，又考虑合理利用农业气候资源以及保护资源和生态环境，实现农业高产优质高效的原则，划分了 3 个带（作为 0 级）、12 个一级区、38 个二级区。

0 级带包括一年一熟带、一年二熟带和一年三熟带，主要按积温划分。以冬小麦-玉米两熟为一年一熟带向一年二熟带过渡的标志，以≥0 ℃积温 4 100～4 200 ℃为主导指标，冬小麦安全越冬条件平均极端最低气温≥－20 ℃为辅助指标。一年二熟向一年三熟带过渡的代表类型是肥（油菜、大麦）-稻-稻三熟，以≥0 ℃积温 5 900±200 ℃为主导指标，后季稻安全齐穗期

——日平均气温稳定通过 20 ℃终止日期为辅助指标。

各个 0 级带内又综合热量、水分、地貌及作物条件分别划分为若干个一级区(表 5.2.1)。

表 5.2.1 熟制划分(带级)

带 名	一 级 区
一年一熟带	青藏高原喜凉作物一熟轮歇区
	北部中高原半干旱凉温作物一熟区
	东北、西北低高原半干旱凉温作物一熟区
	东北平原、丘陵半湿润温凉作物一熟区
	西北干旱灌溉温凉作物一熟、二熟区
一年二熟带	黄淮海水浇地二熟、旱地二熟、一熟区
	西南中高原山地旱地二熟、一熟,水田二熟区
	江淮平原麦稻三熟兼旱三熟区
	四川盆地水旱二熟兼三熟区
一年三熟带	长江中下游平原、丘陵水田三熟、二熟区
	东南丘陵山地水田、旱地二熟、三熟区
	华南丘陵、沿海平原晚三熟、二熟、热三熟区

各一级区进一步划分出若干二级区。全国共有 38 个二级区。

值得一提的是,长期以来我国一直靠提高复种指数来增加粮食总产,解决粮食问题。但有些地方出现农民种粮投入多,产出少,效益低,负担重,越丰收越赔本的问题,不仅粮食上不去,还引发出生态矛盾,导致气象灾害加剧。随着农业科技的发展,人民生活水平的提高及市场经济的发展,农业生产不应再单纯追求复种指数,而应更加注重农产品质量、价格、投入产出比等等。因此,各地的熟制、种植结构、品种搭配、种植方式都不是一成不变的,将随时间和社会发展而发生相应的变化。

(三)农业与气候变率

我国季风气候显著,气象要素变化幅度大,农业气候资源不稳定,给农业生产带来不利影响。在利用农业气候资源规划农业时一定要积极而稳妥,充分考虑到气候变率。

在考虑气候条件确定种植制度、作物布局、品种搭配、作物栽培北界以及进行农业气候区划时,不能只建立在对一年或几年的气候状况的了解上,而应考虑到气候振动,掌握气候演变情况,分析常年气候条件,一些决策应采用有 80%保证率的气候要素值,多年生经济作物还要有更高些的保证。

我国东北、内蒙古、新疆等地热量资源不很充分,也很不稳定,热量条件稍有变动,便会波及农业生产。70 年代东北地区低温冷害比较严重,产量曾大幅度下降。究其原因,一方面是 60 年代中期以后冷害频繁,降温强度大。另一方面,则是一些地区忽视本地气候条件和气候波动情况,片面追求产量,不适当地引种了超越当地热量条件所能满足的晚熟品种及喜温作物,使作物生育期拉长,热量供需矛盾突出。黑龙江省粮食作物不同熟型品种所需要的≥10 ℃积温约差 200 ℃左右,而当地≥10 ℃积温的年际偏差即达 300 ℃。因此,不掌握气候变化规律,不考虑作物品种熟型对热量的不同要求,盲目越区种植,势必造成冷害加重。根据对我国年极端最低气温的波动的分析,华中、华南、西南地区的年极端最低气温从 20 世纪 30～40 年代以来持续下降,尤以华中地区下降最为剧烈,到 60 年代末已降到平均值以下 3 ℃左右,为全国降温幅度最大的地区。因此,在这一地区选择和推广柑桔等亚热带多年生经济作物的种植时应掌握这一规律,谨慎从事。

在全球变暖的大背景下，不利的极端气候事件仍不断发生。各地应根据当地的气候变化特征，结合风险分析，科学调整农作物布局和种植制度。按照市场经济发展和高产优质高效农业需要而进行种植结构调整时，也不能忽视作物的气候适应性。

二、林业与气候

森林与环境特别是气候的关系是一种相互依存的关系。一方面，森林作为一种植物群落，要求有适宜的环境条件，其中光照、热量、水分等气候条件直接影响着各种森林植被的形成和分布，大气中氧气与二氧化碳浓度同森林植被的光合作用也有密切关系；另一方面，森林本身可以形成特殊的小气候，能净化大气，减少污染，影响气候的变化程度和性质。因此，气候与森林二者是相互依赖、相互促进的。

(一)气候与林木生长

光照、热量、水分是林木生命过程中不可缺少的环境条件。光是森林植被生命活动的能源，直接影响其生长、发育、形态和生产力。合理配置森林结构可以进一步提高森林植被的光能利用率。温度是影响林木生长发育和分布的主导因子。在水分适宜的条件下，温带树种在日平均气温 5 ℃时开始萌动。大多数树木种子萌发的最适气温是 25～30 ℃。不同树种的生长温度各不相同。温带树种一般在日平均气温 10 ℃甚至不到 10 ℃便可以生长；亚热带果树，如柑桔在 15～16 ℃开始生长；热带树种，如橡胶要求日平均气温 18 ℃以上才开始生长。

树种分布还与最热月平均温度、最冷月平均温度和极端最低气温有关。如最热月平均气温 10 ℃是乔木林分布的临界值，10～12 ℃有稀疏的针叶林，12～14 ℃适宜针叶树种生长，14～18 ℃为针、阔叶树混交林，18 ℃以上有阔叶树种。

一些热带、亚热带经济林木对低温十分敏感，常有冻害或寒害发生。如柑桔在年平均气温 15 ℃以上，最冷月平均气温 5 ℃以上和全年≥10 ℃积温 5 000 ℃以上才能正常生长、结果。气温低于－3 ℃便会有不同程度的冻害。我国柑桔产量的较大幅度起落主要与种植北界产区的冻害有关。柑桔品质和温度关系也十分密切，北亚热带地区柑桔糖低酸高；中、南亚热带地区一般积温越高，品质越好；而北热带地区品质反不理想。

又如橡胶树原产热带雨林地区，喜温怕寒，喜阳光、微风和湿润。我国植胶地与世界主要胶园相比纬度偏北，越冬期间受寒潮南下影响，常有强烈降温，有时出现霜冻或数日阴冷天气，造成橡胶树寒害，严重时可使一些地区橡胶树大量死亡。在对各地橡胶林栽培的适宜程度进行评价时，常用极端最低气温≤0 ℃频率，日平均气温＜15 ℃的阴冷日数以及在此期间日平均气温≤10 ℃的频率作为指标。

除了平均温度、低温外，气温的昼夜变化与林木生长及木材蓄积量关系也很密切。西藏察隅地区光热水条件较好，同时夜间温度较低，白天有害极端高温较少，有利于营养物质的积累。因此林木蓄积量很大。

林木与温度的关系决定了一定的树种只能分布在一定的热量带内。如热带雨林分布于≥10 ℃积温 8 000 ℃以上，最冷月平均气温不低于 16 ℃的地区；常绿阔叶林分布于积温 4 500～8 000 ℃，最冷月平均气温 0～16 ℃的地区；落叶阔叶林类型积温一般在 3 200～4 500 ℃，最冷月平均气温在－8 至 0 ℃；针、阔叶混交林积温在 1600～3200 ℃，最冷月平均气温－28～－8 ℃，最热月平均气温14～18 ℃；针叶林类型分布于积温低于 1600 ℃，最冷月平均气温低于－28 ℃，最热月平均气温大于 10 ℃的地区。

水分是林木进行光合作用的直接原料。树木叶面积大，需要蒸腾消耗大量水分。因此，相对于草原而言，森林常分布在水分条件较好的地区，至少降水量要大于蒸散量。一般把年降水量400 mm作为森林分布和营造乔木林的基本水分条件。年降水量不足 400 mm，生长季节相对湿度在 65%以下的地区，天然林难以形成。根据对水分需要的不同可分为旱生、湿生和中生 3 种树种。旱生树种抗旱能力强，有樟子松、马尾松、圆柏等；湿生树种在水分条件充足时才能生长，如赤柏、柳树等；我国大部分树种属中生树种，不适宜长期干旱或过湿。人工栽植的各种经济林果也对水分条件有一定的要求。茶树、毛竹和柑桔要求种在年降水量1000～1800 mm的亚热带丘陵山区，苹果、梨等温带果树主要分布在年降水量400～1000 mm的南温带地区和北亚热带地区。水分不足将影响产量、质量，严重时甚至造成植株死亡。

(二)气候与我国森林分布

如上所述，由于林木的生长发育与温度、水分间的关系密切，我国树种的分布，一方面随着气温由北向南逐渐增高，从寒带的单纯森林植被种类逐渐变为热带的植被种类。另一方面，东部地区年降水在 400 mm 以上多分布为不能忍受过旱或过湿的中生树种；西北降水稀少的低海拔地区，除新疆一些河流区有极端旱生的小乔木胡杨生长外，大多因干旱而没有天然森林，形成荒漠植被。此外，受山地温度、降水垂直分布的影响，我国山区森林类型多，甚至西北地区天山、阿尔泰山、昆仑山区以及青藏高原东南部均有较大面积的森林分布。

因此，受经度地带性、纬度地带性和垂直地带性以及局地气候的影响，我国森林主要集中在东半部及西南山区、高原。东部地区的森林植被主要表现为水平地带性分布。

北温带的森林分布在大兴安岭北部。这里气候寒冷，夏季温凉，降水量大于蒸发量，土壤和空气湿度大，对森林植被的生长十分有利。但是由于温度低，植被种类较少，生长缓慢，树种主要是耐寒的针叶林，如兴安落叶松、樟子松、白桦等。

中温带森林主要分布在大兴安岭中南部、小兴安岭、完达山、张广才岭、长白山等地。这里冬季寒冷，夏季温和湿润，降水量自东向西由 1000 mm 减少至 400 mm，多雨雪，土壤湿度大，适宜温带林木生长，林区森林覆盖率 70%～80%，是我国的主要林区和重要的木材供应基地。中温带森林以耐冷的温带针阔叶混交林为主，主要树种为经济价值很高的红松、云杉、冷杉等针叶林以及与红松混交的紫椴、枫、桦等。

南温带光热水资源较丰富，雨热同季，农业历史悠久。这里森林稀少，多零星分布在一些深山区和丘陵地带。森林类型是喜温树种组成的针叶树与落叶阔叶树混交林。主要林木为栎类林、杨桦林等。该区盛产苹果、梨、柿、葡萄、枣等果树。6～8 月的高温多雨季节正值果实增长期，对高产十分有利。因此这里的果树在我国干鲜果品生产中占有较重要的地位。亚热带是热带与温带的过渡带，天然植被既有温带树种，又有热带树种，还有针叶树。其中北亚热带以喜暖湿的落叶阔叶树为主，为落叶阔叶林与常绿阔叶林混交林，主要有杉、马尾松、毛竹等。中亚热带为喜暖树种组成的常绿阔叶林带，树种类型繁多，以壳斗科为主，并大量分布有马尾松、杉木等针叶树种及柑桔、茶树等。南亚热带气候温暖湿润、冬无严寒。植被类型为常绿阔叶林，以壳斗科为主，低山区多为人工栽植的杉木、马尾松。南亚热带还有香蕉、荔枝、龙眼、橄榄等各种热带、亚热带经济林木。

北热带植被主要是喜热树种组成的热带雨林、季雨林、常绿阔叶林等，很少有针叶树。主要分布在台湾山地、海南山地、滇南山区和两广沿海低山区。橡胶、椰子、咖啡等热带经济林生长良好。

我国西部地区气候干旱或高寒，植被多属草原荒漠，森林植被的垂直分带性显著。西北干旱地区山地森林种类单一，只分布在阴向山坡。主要林区有阿尔泰山、天山和祁连山。阿尔泰山林区属西伯利亚泰加森林的延续，以西伯利亚云杉为主；天山林区南坡只有少量针叶林，北坡有大面积雪岭云杉，且垂直地带性明显；祁连山林区为青海云杉。青藏高原地势高亢，气候寒冷，植被以耐寒牧草为主。但青藏高原东南部为高山峡谷地形，气候温暖湿润，适合林木生长。在甘南、怒江、澜沧江、金沙江流域，藏东南及喜马拉雅山南麓等地有大片冷杉、云杉等暗针叶林，树种丰富，生长良好，高大挺直，蓄积量大，仅次于东北天然林区。

(三)森林气候资源的开发利用

我国森林植被资源丰富，材质优良且经济价值较高的树种繁多。其中，既有优良的天然珍稀树种，又有速生丰产林，还有种类繁多的经济林果。特种经济植物和药用植物更是不胜枚举。这与我国森林气候资源的多样性和森林气候的优越性是分不开的。但是，我国各地气候差异很大，森林气候资源的特点及气候条件的利弊不尽相同。加上森林分布不均衡，森林覆盖率和人均蓄积量仍很低，多年的乱砍滥伐造成生态环境恶化，林业生产落后。因此，合理利用森林气候资源，趋利避害，因地制宜，科学管理是十分重要的。它不仅可以改善山区农业生态环境，减轻灾害，而且可以振兴山区经济，使山区脱贫致富，并部分减轻人均粮食不足的压力，具有短期投入，长期受益的作用。主要途径为：

1. 林业气候资源不同，各有特色，应有主有次，因地制宜

(1)东北区森林气候资源的开发利用　东北林区夏季气候温和湿润，利于林木生长，木材蓄积量占全国森林总资源的60%。其主要树种红松材质优良，经济价值很高。东北林区森林对维持该地区生态平衡、保护农牧业生产起着重要作用，应利用气候优势，按照“宜林则林，宜农则农”的原则，保护和发展东北林业基地。采取相应措施保护森林生态环境，保证森林树种不发生明显变化。同时，积极做好森林火险预防和病虫害的防治，保护好森林资源。

(2)华北区森林气候资源的开发利用　华北地区天然森林覆盖率很低，但平原上各种人工种植的防护林较多，对干热风、干旱、风沙等灾害起到重要的防护作用。应充分运用森林这种调节气候的功能，继续大力发展农田防护林，以改善局地气候，提高防御自然灾害的能力。树种以短周期的速生用材树为主。另外，还可大力发展苹果、梨、桃、柿、山楂等各种南温带水果和板栗、核桃、枣等木本粮油树种，以获得更好的经济效益。山区还应继续搞好荒山造林和封山育林，扩大森林资源，发挥森林涵养水源、保持水土的作用。

(3)江南森林气候资源的开发利用　江南林区占全国森林总面积的29.2%。主要集中于中亚热带丘陵山区。这里气候温暖，雨量充沛，林木生长气候条件优越，易成活，成长快，林业发展潜力很大，是我国经济林木的主产区。但长期以来，采伐量超过生长量，森林资源严重破坏，并引起水土流失、河道淤塞。应充分利用这一地区森林气候资源优势，重视森林植被的尽快恢复。大力加强长江流域的水土保持和水源涵养林建设，红壤丘陵山地要充分利用山区气候资源特点，植树造林、封山育林，开展山、水、林、田综合治理，并因地制宜大力发展耐酸的茶、油茶、油桐、柑桔、杉等能发挥自然优势，同时又有经济效益的亚热带经济林木，促进农林牧、副、渔、综合发展。

(4)华南森林气候资源的开发利用　华南地区气候资源优越，植被生产力高。特别是台湾南部、海南岛、两广南部和云南南部森林茂密，树种和珍贵动物繁多，并有热带特种经济林木，是我国唯一的面积不大的热带雨林。应充分利用这种优越的自然条件，大力发展其他地区受气

候限制而不宜栽培，有特种经济价值的热带、亚热带树种，如柚木、樟、橡胶、金鸡纳、八角、肉桂、木棉、椰子等。造林应充分利用光、热、水充裕的优势，提倡多树种、多层次、多功能、多效益，实现林农、林果、林药相结合。同时，更大力发展沿海红松林、木麻黄等防护林体系，以减轻风害和低温。

(5)三北防护林体系建设　位于我国西北大部、华北北部到东北西部的三北防护林地区地跨12个省(自治区、直辖市)，占国土总面积的40.54%。这里尽管光能、风能资源丰富，夏季热量条件较好，但是由于地处西北干旱气候区及与东部季风气候区的过渡地带，降水量较少，气象灾害频繁，植被长期遭滥垦滥伐滥牧，森林覆盖率低，水土流失严重，生态环境恶化。三北防护林体系正是要起到防风固沙，控制水土流失，趋利避害，改善生态环境和农、林、牧结构的作用。其建设中坚持因地制宜，因害设防的原则，根据不同地理位置和自然条件，建设不同生态类型、不同功能的林区，如山地水源涵养林区、沙地(漠)防风固沙林区、平原农田防护林区、黄土高原水土保持林区、以及内蒙古东部护牧林区。在布局结构和组成上实行网、片、带结合，乔、灌、草结合。植树种草中要根据树木、牧草对气候、土壤的要求和当地的降水、温度条件，选择适宜的种类和品种。

2. 植树造林中注意气候问题

植树造林时应注意山地气候特征的科学利用，根据不同海拔、坡位、坡向与森林气候生态型的结合，趋利避害，如利用逆温层的气候优势等。

根据气候相似理论进行种树选育、引种和气候驯化。通过利用和人工控制气候环境，提高育苗和幼苗成活率。

三、畜牧业与气候

畜牧业是人类与自然界进行物质交换的重要经济部门。随着生活水平的提高，人们的膳食结构发生明显变化，对肉、蛋、奶的需求大大增加，畜牧业产值在农业总产值中的比例越来越大。由于牲畜生长需要有一定的气候环境，又依赖草类等饲料的生长，故畜牧业生产与光、热、水、气、土壤等自然条件有种种直接或间接的联系。

(一)畜牧业与气候的关系

畜牧业主要有3种类型——草原畜牧业、农区畜牧业和城郊畜牧业。这3种形式特别是草原畜牧业和农区畜牧业与气候条件的关系密切。牧草的分布、产量、品质，家畜的品种分布、生长发育，畜产品的产量、质量以及牧事活动的进行等都受到天气气候条件的影响和制约。

1. 牧草与气候

牧草的分布、产量和品质与温度、水分条件有直接关系。不同类型的牧草对温度、水分的要求不同。随着各地水热条件的不同组合，形成了各种不同的草场类型。我国的草场大致可分为4类：

(1)北部草场　从呼伦贝尔草原经松嫩平原向西至阿拉善高原和河西走廊，自东向西，热量增加，水分减少，依次形成了温带半湿润草甸草场、半干旱草原草场、干旱半荒漠草场和极干旱荒漠草场。这一地区产草量的分布大致与年平均降水量等值线变化趋势一致，每100 mm降水量产鲜草750 kg/hm^{2}左右。一般情况，荒漠草场为750～1 500 kg/hm^2，而草甸草场可达3 000～4 500 kg/hm^2，加之太阳辐射充足，气温日较差大，因而牧草品质好，营养成分高。

(2)西部草场　主要指新疆境内山地。由于水、热呈立体分布，在不同高度上分别形成了亚

高山草甸和高山草甸、山地草甸草场、山地干草原、荒漠草场和荒漠。产草量高低取决于水热条件的配合程度。过于冷凉或水分明显不足的地区产草量均较低。

(3)青藏高原草场　青藏高原从东南向西北地势由低而高,季风气候影响渐弱,故东南部气候较温暖湿润,西北寒冷干燥。与之相应的草场分布由东南向西北依次为山地森林草原、高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠。产草量因水热条件不同而有很大差异。

(4)南方草场　多呈插花状分散于草山草坡之上,面积很大。由于温暖湿润、雨热同季,草场种类多,生长发育快,割草次数多,产量高。但因阴雨日数多,太阳辐射少,日照时数少,因而牧草品质较差,粗蛋白、粗脂肪和无氮浸出物明显偏少,粗纤维含量偏高。

2. 家畜与气候

温度和湿度对家畜的生长发育有密切关系。温度影响家畜的生长发育,湿度直接影响家畜的体形、疾病及地区分布。家畜在干、湿、冷、暖等不同组合的气候区域长期进化过程中,形成了独特的外貌和遗传特性。其中冬季的低温和夏季的高温对家畜影响最为突出。最冷月平均气温 0～－10 ℃是裘皮羊和羔皮羊的适宜温度,最冷月平均气温－14～－20 ℃可刺激家畜皮毛生长,适宜毛用家畜。最热月平均气温高于 20 ℃时,开始对多数家畜的放牧采食不利。骆驼、驴等耐热性较强。我国气候类型复杂多样,草场种类繁多,因而有各种不同生态型的畜群分布。一般说来,内蒙古呼盟、哲盟、新疆阿勒泰、伊犁等温带偏湿润地区水草条件较好,家畜以马、牛为主;温带半干旱地区绵羊居多;干旱地区主要为山羊、骆驼。而青藏高寒区内的半湿润地区牦牛为优势畜种;干旱半干旱区内绵羊和山羊较多;干旱湿凉地区则以山羊为主。南方亚热带山区主要饲养水牛,可终年放牧。

(二)畜牧业气候资源的合理开发利用

1. 牧区畜牧业

根据牧业生产对气象条件的要求,对照我国各地气候资源情况,可以发现各地都存在不同的牧业气候问题,其中牧区牧业生产的气候问题更为突出。

首先,多数牧区水热条件不协调,产草量低。我国牧区大多位于西北干旱、半干旱气候区和青藏高寒气候区。这些地区或热多水少,沙化严重;或温度过低、热量不足,加之人为超载过牧,导致产草量不高,草场生态平衡遭到破坏。水热不协调和过度放牧造成北部、西部牧区草原退化严重。

其次,季节草场不平衡。北方草场大多位于中温带,青藏高寒牧区部分还处于高原亚寒带,四季分明,冬季漫长寒冷,全年生长期较短。因此,放牧的牲畜常被迫转移,草场也只能按季节利用。北部牧区和青藏大部分牧区草场为冷季草场(冬春场)和暖季草场(夏秋场)。其中内蒙古、黑龙江等北部牧区基本上根据水源条件分区放牧。新疆塔里木河流域牧区的冷季草场选在地势较高,有逆温的阶地或胡杨林内,或在沙丘中背风向阳有水草之处。暖季草场多在流域及河滩等饮水条件较好的地方。青藏高寒牧区牲畜冷季在海拔 4 500～3 500 m 以下的河谷、湖盆和低山带的草甸、草原草场上越冬、度春,暖季则在海拔 3 500 m 以上的亚高山、高山草甸上育肥抓膘。各地暖季草场的利用时间约 120～160 d,而冷季草场放牧时间达 200～230 d。育肥抓膘的时间大大少于越冬消耗的时间。

另外,我国牧区干旱、暴风雪、白灾、大风、风沙、冰雹等畜牧气象灾害较多,牧业抗灾能力低下。

干旱是我国牧区最普遍、最主要的灾害之一,发生范围广,出现频率高,对畜牧业危害重。

春旱影响天然牧草的返青和人工牧草的播种、出苗，导致青草期缩短，并使牧草产量降低，品质变差。春、夏连旱除造成牧草大幅度减产，影响当年抓膘和冬季饲料储备外，还会加剧草原退化和草原土壤沙化进程，更甚者将使地下水位下降，河水断流，人畜饮水困难。重春旱区主要在新疆阿尔泰山南麓至准噶尔盆地、藏北高原西部、青海湖至祁连山西段和内蒙古西部，出现频率为 20%～40%；重夏旱区主要发生在内蒙古西部、河西走廊、柴达木盆地及新疆大部，发生频率为 10%～20%；重春夏连旱区主要在新疆各盆地、河西走廊和阿拉善高原，发生频率一般在 40%以上。除春旱、夏旱外，草场还会发生冬季至春季无积雪或积雪少而使牲畜缺少饮水造成的旱灾(黑灾)。黑灾主要发生在内蒙古西部、新疆南部、河西走廊北部和祁连山中、西部和柴达木盆地牧区，几乎年年出现。

其他灾害如暴风雪、白灾(大雪覆盖草场，牲畜吃不到草料所造成的灾害)、大风、风沙、冰雹和洪水是一些局部发生的灾害，一旦发生常造成严重危害。特别是冬、春季转场期间家畜体弱，暴风雪、白灾、大风天气会造成大批家畜冻饿死亡。为了发展畜牧业，应顺应我国牧区的畜牧气候特点，扬长避短，合理开发利用牧业气候资源。

(1)顺应气候规律，发展草原季节畜牧业。为了改变牧区季节草场不平衡和家畜夏壮秋肥冬瘦春乏的不利局面，应从合理利用气候资源的角度出发，发展季节畜牧业。即不要单纯追求年终存栏率，而在冷季保持最低数量的家畜，以减轻冷季草场的压力，结合补饲，避免春乏死亡；暖季以暖季草场的载畜能力作为本年度家畜头数发展的上限，使新生幼畜能充分利用生长旺季的牧草。冷季来临时，当年幼畜出栏肥育、屠宰，当年收获畜产品。这样可以加速畜群周转，提高牧草-畜产品转化比率，获得较好经济效益，提高草原生产力。其中关键是因地、因畜种制宜，选择最经济的屠宰期，以达到既减轻冷季饲料不足的压力，又能增加畜产品产量的目的。

(2)农牧结合，发展育肥饲养畜牧业。考虑到我国牧区畜多草少的矛盾和季节草场不平衡的特点，可以采取牧区繁殖、异地育肥、农牧结合的措施。即入冬前将夏、秋放牧羔羊或犊牛中的一部分瘦弱牛羊转移到农区或半农半牧区短期育肥。这样可解决冬牧场饲料不足的困难，还可使瘦弱家畜得以育肥，增加收入。我国从呼伦贝尔沿大兴安岭西麓，经乌兰浩特、泰来、张家口坝上、榆林、环县至兰州南部有一条宽窄不等的农牧过渡带，降水量≥400 mm 频率在 20%～50%之间。其中内蒙古东部和东北西部的半干旱气候地区草原辽阔，是我国重要的畜牧业基地。与其东邻的东北半湿润气候区，土地肥沃，光热水资源适宜，是我国重要的商品粮生产基地。按照农牧结合的方针，可在内蒙古东部半干旱草场繁育肉用犊牛，长大后转移到东部半湿润玉米产区育肥。同时，建立大型肉类联合企业，进行加工和销售，这样既可减轻草场压力，提高草场利用率，也为东三省粮食找到就地转化的手段。因此，这是一种合理有效利用农业气候资源的途径。

2. 农区畜牧业

我国农区畜牧业在整个畜牧业中占有重要地位，是目前城乡肉、蛋、奶的主要来源。北方农区畜牧业主要饲养羊、猪、牛，南方农区畜牧业主要是猪和牛。由于南方温暖湿润，形成众多的草场类型，草山草坡星罗棋布，牧草种类多，生长快，产量高，因此南方农区畜牧业有很大的发展潜力。

南方草山草坡，是指在热带、亚热带山地可供畜牧业利用的各类草地，即秦岭、淮河、白龙江以南的山地丘陵(四川阿坝、甘南地区和云南迪庆地区除外)，主要分布在 1000 m 以下的低山和岗地丘陵区。其基本特点是：与农田、森林交错分布，面积较大的连片草山多分布于

1000 m以上的山地，1000 m 以下的草山块小数量多。南方草山草坡总面积约0.87×10^8hm²，其中可利用面积约0.45×10^8hm²，已利用面积约占30%～45%。热带、亚热带地区，草场气候资源优越，热量条件好、无霜期长、湿润多雨且雨热同季，牧草种类繁多，草地类型多样，牧草生长快、产量高，草场利用时间长。这些地区的牧草四季长青，群落盖度大，生长茂盛，一年可刈割 3～4 次，可达 6 000～12 000kg/hm²，为北方草地的 4～6 倍。但由于南方夏季炎热，温度过高，使品质优良的人工牧草难以越夏。而天然牧草又由于阴雨日、雾日多，空气湿度大，太阳辐射少而品质较差，营养价值不高，粗纤维含量高，粗蛋白偏低，豆科牧草缺乏。另外，南方夏季炎热，超出家畜生长的适宜温度，不利于正常采食、休息，进而影响生长、繁殖。

北方寒冷对一些家畜的生长不利。如低温时猪为了维持体温恒定，要消耗更多热能，严重时会因体力消耗过大而成为光吃不长的仔猪。初生仔猪还易冻死。

为了更好地发展农区畜牧业，需要从影响其发展的气候问题入手，制定相应对策：

(1)南方草山草坡光热水资源丰富，牧草生长期长，应当充分利用这一优越气候条件，引进、选育适应南方气候、土壤特点的优良牧草，建设高产优质的豆科牧草，改良天然牧场，建立半人工草地，建立人工放牧场和打草场，改变放牧方式，以草定畜，根据气候特点建立适宜的畜种结构。同时，积极扩大饲料来源，并利用水面多的优势，发展水葫芦等水生植物饲料。

(2)北方农区夏季高温多雨，配合协调，各种植物生长条件适宜。除利用余粮饲喂外，可以利用宝贵的光热水资源，积极扩种青饲料和多汁饲料，改善家畜的饲料种类。

(3)根据天气气候变化，科学饲养家畜。夏季高温时早晚放牧，中午遮荫休息，并多喂青草和多汁饲料。圈舍可采取降温措施，减少饲养密度。冬季应注意采取防寒保暖措施，适当加大饲养密度，舍内保持干燥，加强对初生幼仔的护理。棚、圈、舍的建设和维修要考虑保温效果。

四、水产业与气候

(一)水产业与气候

水产业是在一定的自然条件下进行的。温度、溶解气体、溶解盐、光照条件等环境自然因素与水生生物有着直接和间接的关系。其中温度是水生生物生活环境中最基本、最重要的因素之一，它直接或间接地影响水生生物的生长发育、数量消长以及水产资源的地区分布。同时，温度条件的变化还会影响食物的丰富程度和水中与生物有关的物理、化学因素的变化，从而间接支配着生物的生活和生存。

环境温度可直接、间接影响水生生物的营养、代谢、生长、发育和繁殖。在适宜温度范围内，随温度的升高，水生生物摄食强度增大，代谢作用加强，生长加速。温度对水生生物繁殖的影响更为明显。水温累积值达到一定的数量，水生生物的性腺才能发育成熟。在适温范围内，随温度升高发育加快，性成熟提早。其产卵时间、产卵量及繁殖率也与环境温度有直接关系。另外，水温降至 10 ℃以下时，鱼虾类均需蓄养越冬。水温过低、寒冷天气、放养不适时都会引起大量死亡。

由于水生生物对水温有不同的适应性，因此水生生物的地理分布基本分为冷水性、冷温性、温水性、暖温性和暖水性 5 种。中国地域辽阔，气候差异大，淡水鱼类可划分北方、华西、宁蒙、华东、华南等 5 个区，各种适应性的鱼种都有分布。

水产生物的养殖过程与温度、湿度、气压、光照等天气气候条件以及水中溶氧量、食物有直接关系。例如夏天出现阴雨寡照天气或数日高温后骤然下雨，气压降低，会出现鱼虾浮头泛池，

甚至死亡。池塘养鱼生产中施肥后浮游生物达到高峰的时间随水温和天气情况而不同。水温适宜,天气晴朗,可较快达到肥水标准;反之,若出现阴雨天气,气温低,光照不足,水质往往迟迟不易转肥。此时若盲目追肥,将使天晴后水体内堆积的肥料分解,引起缺氧,甚至造成鱼虾窒息。投饲数量和方法通常要根据季节、天气、水温、水质条件和吃食情况来决定。另外,养殖对象人工繁殖中的亲鱼培育、催产、孵化等也都与气候条件息息相关。

江河渔汛期间的天气状况,如温度、降水、光照、风向对鱼苗捕捞等影响很大。池塘养鱼要根据天气、水温决定捕捞时间,而捕捞时间的早晚又直接决定了鱼类产量。春季温暖,鱼汛来得早。产卵和鱼卵孵化期间温度适宜则捕获量高。强降水过程次数多,可使江水陡涨的次数多,刺激亲鱼产卵。晴天阳光照射多,鱼苗捕获量也高。海洋鱼类的捕捞量取决于鱼类的洄游期、洄游路线。而洄游期及路线则主要受海温变化、降水量多少、风向、冷空气活动以及外海盐水浓度变化等因素制约。

(二)中国的水产气候资源

1. 热量　热量条件不仅影响水生生物的生长发育、栖息分布和鱼虾的洄游期和洄游路线,而且影响水生生物的生长期长短、性成熟迟早,因而对水产业影响最大、最直接。我国内陆水域的 60%(不包括青藏高原)和广阔的海洋渔场、养殖区分布在南温带至热带之间,为水产生产提供了优越的热量资源。而位于北温带、中温带的东北地区,由于夏季温度较高,加之日照时间长,太阳辐射强,大部分地区 1 年中也可有 5 个月左右的时间养殖水温在 15 ℃以上便可生长的鲢鱼、青鱼、草鱼、鲤鱼等鱼种。青藏高原海拔高、气温低,湖泊水温与东部平原同纬度湖泊相比可差 20 ℃以上,因此,鱼类生长缓慢。

中国海域辽阔,大陆海岸线长,大部分海域和近海滩涂自然条件比较优越。从对海洋生物最重要的水温条件看,中国海年平均表面水温自北向南增加,并有较明显的季节变化。冬季 2 月水温最低,夏季 8 月水温最高。冬季表面水温自北向南逐步升高,夏季南北地区间的水温差异远较冬季小。掌握水温的分布和变化,在适温范围内进行捕捞可大大提高捕获量。在滩涂养殖业中,也必须考虑海上生物对盐度和水温的适宜范围。

我国宽广的大陆架浅海及滩涂地区,具有十分优越的自然条件。海底平坦、水质肥沃,饵料丰富,又是冷暖水系交汇的地方,夏温不高,越冬条件好,为各种水生生物提供了良好的生长、发育、繁殖、索饵条件,构成了我国良好的渔场和滩涂养殖业基地。

辽河三角洲浅海及滩涂地区年平均气温在 9 ℃左右,春季温度回暖快,是多种经济鱼、虾、贝、蟹类产卵、索饵的场所。辽东湾是著名的渔场之一,双台河口盛产的中华绒螯蟹是主要的出口水产品。辽东半岛南部岸段港湾水深,冬季暖水区不淤不冻,适宜发展刺参、鲍鱼、扇贝等有经济价值的海珍品养殖业。

渤海 5 月中旬,10 m 等深线以浅海域的水温在 18 ℃左右,盛夏水温不超过 28 ℃,对虾产卵、生长十分有利。加之,渤海水质肥沃,饵料丰富,是许多鱼虾类和贝蟹类产卵的所在地。岸段滩涂的对虾养殖业也发展很快。

苏北海州湾风速小,秋季降温迟,适宜发展海水养殖业,已成为我国主要的人工养殖对虾基地。上海岸段海涂地区夏季气候凉爽,静风天气多,泛塘现象一般比内陆轻。

钱塘江口和杭州湾岸段由于季风气候的季节性变化,给经济鱼类的季节洄游提供了极为优良的条件,从而构成了春、夏和秋、冬两大渔汛,使舟山成为我国最大的渔场。浙江岸段屏蔽条件好,风浪小,气候四季温和,且水域广阔,水质好,滩涂遍布,有利于藻、贝、鱼、虾等海水养

殖业的发展。

福建、广东、广西岸段海岸线长，港湾众多，气候温暖，雨量充沛，水生动植物品种数量多，适生季节长，是国内重要的海洋渔业基地，对虾、贝、海参等养殖业十分发达。

2. 光照　我国约有 1/4 的内陆水域分布在东北、内蒙古和西北地区。这里年平均气温低，生长期短，冰冻期较长，但全年光照充足，水体光合作用强，初级生产力较高，加之夏季水温较高，为鱼类生长的黄金季节。而川黔地区水体光合作用弱，浮游生物量少，初级生产力级较低，一些滤食性鱼类如鲢、鳙的产量常受影响。

3. 降水　我国淡水水域的主要水源是大气降水，因此，降水量多寡及其季节分配与水产生产中所需要的水源、水的肥沃度，以及水产生产的稳定性有很大关系。我国东南地区降水充沛，地表径流量大，水体的有机质和无机盐类较多，因而水质较肥沃，水产业的发展条件优越。但华南地区降水过多过猛，水体交换量过大，影响到水体养分的积累。北方地区雨季来临迟早不一，降水量年际变化大，常造成水源不稳定，直接影响水产业的发展。此外，沿海地区降水量的多少和季节变化对沿海海区的盐度和交汇区的位置有很大影响，从而通过海洋生物栖息地的改变而影响其分布。

(三)水产业发展中的气候问题及对策

1. 气候问题

我国气候多样，为不同种类的水产生物提供了不同的适生条件。但是受季风气候的影响，各地温度、降水分布不均，年际波动较大，也给水产业的稳定高产发展带来一些不利影响。

(1)东北、西北、华北北部冬季严寒，鱼类能否安全越冬是这些地区淡水养殖业的主要气候问题。越冬池中气体溶氧量减少、水温过低、放养不适时等均可导致鱼类冻死。这些地区夏季降水年际变化较大，水体水位存在明显的丰枯变化。干旱时水源不足会影响水产业稳定发展。另外，春季温度回升慢，气温低，亲鱼产卵较迟，鱼苗鱼种来源短缺；秋季降温较早，鱼类生长期较短。

(2)长江中下游地区和华南沿海地区夏季温度过高，抑制水生生物的健康生长，致使池塘常发生鱼虾类浮头泛池。长江中下游地区盛夏常有伏旱天气，也存在农渔用水的矛盾。华南地区因雨大、雨猛，河流、水库水体交换量大，浮游生物和营养盐流失较严重。

(3)云贵高原夏季热量水平不高，温度偏低，鱼类缺乏旺盛的生长期，加上生长季节较短，限制了水产养殖业的发展。另外，云贵高原西部干湿季明显，春末夏初雨季未到时，山塘、水库常常干涸。

(4)海洋渔业区中，渤海、北黄海的近岸、浅海区海水养殖的主要问题之一是自然越冬困难。东海浅海养殖区秋季常有高温天气，雾、露日数较多，紫菜病烂问题突出。南海浅海养殖区气温较高，养殖产品的储运加工比较困难。

2. 对策

从合理利用农业气候资源的角度出发，可以从以下几个方面来促进水产业的稳定发展。

(1)水体小气候资源的利用：在适宜水质和水源保证下，利用局地水体或局部水层特有的光温水资源为鱼类生长创造较好条件，是促进水产的产量效益与经济效益同步增长的有效途径。我国值得注意的有南方稻田养鱼、流水养鱼、塑料大棚和温室养鱼；北方冬季在大水库或近岛海湾实行沉箱越冬养鱼。

(2)选用适应当地气候条件和水域等生态环境的养殖种类和品种，在引进新品种时尤其要

注意原产地和引进地的水产养殖气候是否相似。在有条件的地方,可实行混合放养,以充分利用当地有利的气候、水体条件。

(3)华北、东北等北方地区可充分利用水库、洼淀等自然水域发展水产业。长江中下游地区自然条件优越,是发展潜力较大的优良渔业基地,应扩大养殖面积,并提倡稻田养鱼。华南地区库、塘水质肥沃,应以池塘水库养殖为主,多放养名贵优质鱼。进行池塘养殖池的结构改造,设法增加受光面积,克服夏季高温影响。此外,密切注意养殖业与天气气候、水体等环境条件的关系,科学饲养,力争获得较好的经济、生态、社会效益。

第三节　山区农业气候资源的开发利用

我国境内山脉纵横,丘陵起伏,山区面积约占全国国土总面积的 2/3 左右。各地山区因山体的大小、走向、海拔高度、地势起伏不同而造成热量、水分的重新分配,形成了复杂多样的地形气候,进而出现了土壤、植被、农业类型的垂直地带差异和水平不连续分布。因此,合理开发利用山区农业气候资源对于我国的农业发展意义重大。本节在叙述山区农业气候资源特点的基础上,提出合理开发利用山区农业气候资源的若干对策,以促使山区农业气候生产潜力进一步发挥,农林牧各业稳定协调发展。

一、山区农业气候资源的主要特征

(一)热量、水分、光照条件垂直变化明显,农业气候资源呈立体性

高大山体的气候呈明显的垂直分布。一般说来,随着海拔增高,热量和日照时数减少,降水量和空气湿度增加。在亚热带东部山区,每升高 100 m,≥10 ℃积温减少 150～250 ℃,持续天数减少5～6 d;≥20 ℃积温减少 200～300 ℃,持续天数减少 7～10 d(表5.3.1)。北方山区也有类似规律。新疆各大山区≥0 ℃、≥10 ℃的初终日、持续日数和积温的垂直递减也是很明显的(表 5.3.2)。

表 5.3.1　亚热带东部山区热量资源的直减率值

项目	平均气温(℃/100 m)					积温(℃/100 m)			持续天数(d/100 m)		
	年	1月	7月	最高	最低	≥10 ℃	≥15 ℃	≥20 ℃	≥10 ℃	≥15 ℃	≥20 ℃
直减率范围	0.3～0.7	0.3～0.5	0.4～0.8	0.4～0.8	0.2～0.6	150～250	150～250	200～300	5～6	5～8	7～10
平均值	0.49	0.41	0.57	0.60	0.40	190	192	225	5.3	5.9	7.8

表 5.3.2　新疆不同山地≥0 ℃和≥10 ℃初终日、持续日数和积温的垂直梯度(℃/100m,d/100m)

项目	阿尔泰山南坡(700～2000m)		天山北坡(600～2000m)		天山南坡(1300～2000m)		昆仑山北坡(1200～1800m)	
	≥0 ℃	≥10 ℃	≥0 ℃	≥10 ℃	≥0 ℃	≥10 ℃	≥0 ℃	≥10 ℃
积　温	160	190	110	130	290	320	430	510
持续日数	5	9	3	5	6	9	6	15
初日(推迟)	3	5	2	3	3	4	4	10
终日(提前)	2	4	1	2	4	5	3	5

由于阴雨日、雨量的增加，山区日照时数、总辐射量随高度增加而减少。亚热带东部一些山区在500～800 m处为最少日照层。此外，山区云雾多，空气湿度大。如亚热带山区每升高100 m，雾日增加15～25 d。多雾使山区散射辐射增加，对茶、竹、食用菌、中药材等一些耐荫湿植物的生长十分有利。

山区气候条件的垂直变化使各种农林作物的物候期、生育期长度、经济性状都随高度而发生相应变化，进而导致农产品产量、品质的改变。如随着海拔升高，水稻主要经济性状变差，株高变矮，穗头变小，总粒数和实粒数下降。可见，气候条件特别是热量条件的垂直变化对作物布局和生长的限制是很明显的，山区粮食产量普遍偏低。但是，从另一方面看，山区光、热、水条件在垂直方向上的变化及其不同组合形成了各种不同类型的农业气候层及相应的植被、土壤环境，为农林牧各业的分层利用提供了有利的生态环境，并在不同的高度形成了各种经济林木的气候适宜优势生长高度。例如云南红河河谷从谷底(250 m)到山顶(2 540 m)依次出现热带、北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带和温带的气候特征，农作物由热作终年生长、水稻两熟或三熟渐变为水稻两熟，可栽培冬小麦和油菜，往上为水稻一熟，多旱地作物，再往上只能种植小麦、荞麦等喜凉作物，最后出现高山草甸植被。又如我国亚热带地区山地丘陵多，形成多层次的农业气候生态类型。平原低地湿热，适宜发展粮食和经济作物；山地丘陵可分层利用，栽培油桐、茶、油茶、漆树、毛竹、杉木等经济林木。此外还有大量荒山草坡，可作为南方农区的草食畜牧业基地。

(二)受地形影响，农业气候资源呈多样性

除海拔高度外，山体屏障、地势起伏、坡地方位等地形因素的作用使农业气候资源水平分布不均衡，山地农业气候更为错综复杂。

高大山体两侧气候存在显著差异，其中东西走向的山体直接阻挡北方冷空气侵袭，使南北两侧形成迥然不同的农业生产类型。华北燕山、军都山、恒山、五台山、云中山的屏障作用使南北两侧冬季低温相差4 ℃以上，成为只能种植一季春麦的无复种地区和以冬小麦为前茬的稳定复种区的分界线。南亚热带博平岭、云开山系南侧1月平均温度比北侧高1～2 ℃，100 m以下处盛产橡胶、胡椒等热带作物。

在地势起伏的地方辐射、日照、通风、夜间冷空气流向等各不相同，造成不同地段间气候状况有很大差异，尤以温度明显。盆地谷地白天增温快，夜间常形成冷空气湖，作物容易遭受辐射霜冻危害。例如亚热带东部丘陵山区盆、谷地无霜期比开阔地少20～30 d，而山顶、陡坡上部无霜期比开阔地多20～25 d。盆谷地的不同开口朝向地段可形成不同的避寒环境。例如，冷空气难进难出地形易受辐射型寒害；易进易出地形处风口，受平流型冻害威胁较大；易进难出的地形条件十分不利，种植不耐寒作物的风险很大。最好的喜温作物避寒环境是冷空气难进易出，背风向阳的地形。从表5.3.3可以很清楚地看出这一点。

表5.3.3 福建1975/1976年冬不同环境类型区橡胶寒害比较

地点	诏安金星湖内	云霄火田	龙霄龙透	漳浦大南坂
环境类型	难进易出	难进易出	难进难出	易进难出
平均寒害级别	0.78	0.80	2.4	2.78

盆谷地的一定高度上常形成逆温层，冬半年晴天较显著，峡谷地比宽谷地明显。新疆中低山区因积雪或戈壁滩的强烈辐射而形成逆温，强度一般 0.4 ℃/100 m，逆温层高度以天山北坡的 3 000 m 为最高，其余多在 1 500 m 以下。亚热带东部山区以武夷山、罗霄山西坡和南岭南坡、大别山为逆温多发山区，出现高度多为300～500 m，强度 1.0 ℃/100 m 以上。西部亚热带山区全年出现逆温的频率为 6%～38%，其中冬季(12～2 月)平均 36%。逆温层厚度一般为 300～500 m，冬季最显著，一般可达 0.2～0.7 ℃/100 m。西双版纳热带区可达 2.0～3.0 ℃/100 m。山区逆温在一定程度上可改善冬季温度条件，对作物和牲畜的越冬十分有利，是一项宝贵的农业气候资源。

山区不同坡地、方位接受的太阳辐射及盛行风强弱的不同造成温度、降水的分布不连续，形成不同的农业生态环境。云南橡胶垦区的山地南坡温度高于北坡，橡胶寒害等级相差 2～3 级以上，有的品系在南坡基本无寒害，而在北坡竟不能种植。加之受西南季风影响，在迎风多雨的南坡、西南坡配置适宜的品系，可以成为橡胶生产宜林地。

二、山区农业气候资源的合理利用

目前，广大丘陵山区由于农业生产技术落后，交通不发达，土壤气候条件较差，生态环境脆弱，致使农业产量低，中低产田面积大，同时经济林果品质差，丰富的农业气候资源不能得到充分利用。另一方面，由于缺乏统一规划，片面追求眼前利益和经济效益，破坏了生态环境。因此，只有合理开发山区农业气候资源，把气候资源优势转化为商品优势和经济优势，才能根本改变山区的贫困落后面貌。

山区农业气候资源合理利用的途径很多，概括起来主要包括以下两个方面：

(一)布局立体农业，促进农林牧业全面发展

针对山区农业气候资源立体性的显著特点，合理布局立体农业，可以促使农林牧各业得到综合、协调发展。

我国亚热带东部地区是重要的粮食和亚热带经济作物生产基地。这里山地丘陵多，形成了多层次的农业气候生态环境。

张养才等在亚热带东部山区农业气候资源研究中，选择积温、最热月平均气温、极端最低气温、4～10 月干燥指数 4 个农业气候要素，组成南、中、北亚热带东部山区农业气候资源垂直分层指标(表 5.3.4)，运用聚类分析最小原则，建立分层模式，计算农业气候变量综合作用形成的农业气候层：

$$H_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_{ij} - y_{ij})/b_{ij}, \tag{5.3.1}$$

式中，H_j 为不同坡向农业气候变量综合作用的分层指标高度，y 为不同的山区或坡向的农业气候变量，a、b 为农业气候变量统计系数，i 代表农业气候变量因子，j 代表不同坡向，n 为农业气候变量数。

表 5.3.4 亚热带东部山区垂直农业气候资源分层指标系统

带名	层名	层号	农业气候指标				主要农业气候特征	农业生态类型
			主导指标			辅助指标		
			$\sum T \geq$ 10 ℃ (0℃)	最热月平均气温(℃)	极端最低气温多年平均值(℃)	4～10月干燥指数		
南亚热带	热作多熟农作热层	LS_1	6500～8000	＞27.0	＞0.0	0.7～0.9	冬暖夏高温多雨，生长期长，雨热同季时间短，偶有寒害	一年三熟，双季稻、甘蔗、龙眼、荔枝、香蕉、柑桔
	农、经(喜温)混作暖湿层	LS_2	5500～6500	27.0～25.0	0.0～－3.0	0.4～0.7	夏热，春阴雨低温，秋低温，生长期长	一年三熟或二熟，宜发展柑桔、茶叶
	经、农混作温湿层	LS_3	＜5500	＜25.0	＜－3.0	0.2～0.4	冬冷夏暖湿润，日照少，有早晚霜冻	稻杂粮(或油菜)一年二熟，适宜发展茶叶、杉木
中亚热带	农、经(喜温)混作暖热层	LC_1	5 300～6 500	＞28.0	＞－6.0	0.7～1.0	夏炎热，伏旱，春秋阴雨低温，生长期长，偶有冻害发生	一年三熟或二熟(双季稻或稻麦或油菜，肥)适宜发展茶叶、柑桔
	农、经(喜温)混作温湿层	LC_2	5 300～4800	28.0～26.0	－6.0～－8.0	0.5～0.7	夏热冬冷，时有春旱，春、秋有低温冷害，冬有冻害	一年二熟为主，部分地区可以三熟，适宜发展茶叶、油菜、毛竹、杉木、油桐等
中亚热带	经、农混作凉湿层	LC_3	4 800～4 300	26.0～24.0	－8.0～－10.0	0.3～0.5	冬冷夏暖，日照少，冬有冻害	一年二熟(水稻、油菜或杂粮)，适宜杉木、毛竹、油桐等
	林牧业湿冷层	LC_4	＜4 300	＜24.0	＜－10.0	＜0.3	温凉湿润，日照少，多云雾、多冻害	主要发展林业，间种杂粮或牧草、药材
北亚热带	农、经(喜温)混作温暖层	LN_1	4 500～5 300	＞26.0	＞－9.0	0.6～0.8	夏热冬冷，春、夏旱，春、秋有低温冷害，冬有冻害	稻、麦二熟为主，部分地区有三熟
	经、农混作凉湿层	LN_2	4 500～4 000	26.0～24.0	－9.0～－11.0	0.4～0.6	冬冷，夏温暖，有旱、晚霜冻	一年以稻、麦(或杂粮、油菜)二熟为主，适宜发展茶叶、毛竹、油桐、漆树、猕猴桃
	林牧业湿冷层	LN_3	＜4 000	＜24.0	＜－11.0	＜0.4	温凉湿润，日照少，多云雾	主要是发展林业，间种杂粮、牧草、药材等

按(5.3.1)式计算了中国南、中、北亚热带东部山区各坡向不同类型的垂直农业气候层。在此基础上,中国亚热带丘陵山区农业气候资源研究课题提出了"巩固下层,保护上层,以开发利用中层为主"的方针。

下层(300～400 m 以下)是亚热带的基带层,热量、水分资源已得到较多的开发利用。目前应在保证粮食的前提下,适当扩大经济作物面积,发展薪炭林、食草畜禽和水产养殖,使农林牧渔全面发展。其中,南亚热带的下层主要应利用冬暖优势,扩大冬种,发展蔬菜生产;中亚热带下层为农、经混作层,应进一步扩大经济作物面积;北亚热带下层应立足于提高粮、经作物单产,利用缓坡和有利地形发展果、茶、桑等商品生产。

中层(400～800 m 或 400～1 000 m)地处过渡层,山区农业气候资源优势明显,是一季杂交水稻栽培和多种经济作物、林木生长的优势高度,开发潜力很大,是近期山区开发的主攻层次。此层要在保证粮食自给或基本自给的前提下,大力发展经济林和用材林。南亚热带可发展茶叶、柑桔;中亚热带中层应大力发展茶叶、油茶、油桐、杉木等;北亚热带中层水热条件稍差,应在提高粮食单产基础上,积极开发食用菌等名特优农副产品。离城市较近的中层山区可利用夏凉优势种植蔬菜,解决城市蔬菜淡季供应问题。

上层(海拔 800～1 000 m 以上)以中山为主,气候湿冷。农业开发利用应以保护生态环境为主,实行保护性开发,1200 m 以上应大力发展水源涵养林、水土保持林。

热带山区应充分利用光热水资源丰富,植物生长量大的优势,建立具有热带森林特征,多树种、多层次、木本为主的热带人工生态系统,如林胶茶、林胶热(作)等方式。

东北、华北、西北山区也有丰富多样的农业气候资源,可分层合理开发利用。北京沿西山、军都山前平原为一暖区,可利用此优势在浅山缓坡发展苹果、梨、板栗、核桃等干鲜果品。新疆山区气候及相应植被、景观垂直带十分明显,有利于分层利用。例如天山北坡从低处到高处可分别为发展羊、马等畜牧业和用材林、水源涵养林,河谷平原和山间盆地则可发展农业。

(二)利用有利地形和层次,建立商品生产基地。

山区复杂多样的地形气候,为发展多种经营提供了有利条件,但同时又易发生各种气象灾害。在开发利用山区时,应扬长避短,充分利用有利地形和层次,其中山脉走向、高度、结构、朝向等都是选择最佳利用地域或地段时要考虑的主要因素。例如背对冷空气来向,坡面向阳的马蹄形地形中冷空气难进易出,是喜温作物、热带作物最好的避寒环境。福建利用博平岭东南坡 400 m 以下的背风向阳马蹄形地形,在 20.5°N 以北的南亚热带地区成功种植橡胶和一些珍贵热带水果。

山区一定高度上显著而稳定的逆温是一项宝贵的气候资源,充分利用逆温可以改善多年生经济作物、林果及牲畜的越冬条件。福建西北的崇安种植温州蜜柑冻害机率为 24%。而建立在海拔 400～700 m 处于逆温带中的桔园,极端最低气温提高 1.5 ℃以上,可安全越冬。又如云南遮放坝户弄寨海拔 800 m 处橡胶受中寒害,900～1 100 m 的逆温带内橡胶长势良好,仅偶有轻寒害。北方冬季逆温带是牲畜过冬和果树安全越冬的有利场所。新疆伊犁地处海拔 1 350～1 530 m 的野果林区内,1 月平均气温比河谷高3.7 ℃,使霍城、巩留、新源等地成为苹果天然基地,1 600～1 800 m 之间的山地草场可以放牧,解决越冬草场的不足。

温度、降水随高度和地形的变化及不同组合,使对气象条件要求各异的经济林木分别形成了生长的优势高度。应当发挥气候资源优势,引用先进适用技术,积极发展优良树种,建立高效益的名、优、特、稀商品生产基地,使丰富的资源得以充分利用,促进山区经济的繁荣发展。例如

杉木是我国特有的优良速生树种，木材占全国商品材的 1/5～1/4。它喜温暖湿润的多雾静风环境。我国中亚热带中部和南部山区是最好的杉木生产基地。但一些地区布局不合理，低丘岗地种植比例偏大，因而经济效益较差。一些地区过分强调集中造林，树种单一。因此，应根据山区气候条件，选择既无高温又无严寒的中海拔杉木生长优势高度。一般说来，北亚热带为 200～600 m，中亚热带为 300～1 000 m，南亚热带为400～1 200 m。在这些优势高度杉木生长快，产量高，质量好，经济效益高。另外，还应结合土壤条件，在不同高度上选择不同坡向种植，并实行杉木和阔叶林块状混交。

猕猴桃是山区自然繁衍的野生果树，喜温凉湿润气候和酸性、微碱性土壤。主要分布在 23～34°N 的山区。我国猕猴桃自然分布北界在秦岭、伏牛山至大别山一线，南达两广山区以及云贵川山区。近年来，因其营养丰富，经济价值高而成为一种新兴栽培水果。亚热带山区猕猴桃集中分布在海拔 500～1 500 m 的中低山区，常见于阴坡、半阴坡的中下部以及水旁、溪边。鉴于猕猴桃的经济价值，应该作为山区名特优新产品而大力开发利用。

我国亚热带东部山区温暖湿润，栎类林多，砍伐后萌发力强，很适宜发展各种食用菌，特别是高产优质的椴木菇、耳。北亚热带丘陵山区适宜发展优质的大厚型香菇；中亚热带和南亚热带山区阴雨多，湿度大，适宜发展产量高的中厚型香菇；黑木耳则适宜在 300～600 m 的中低山区栽培。由于栎树为速生树种，又是最优食用菌资源，因而要注意大力保护和开发栎树资源的生态经济优势。

第四节 农业气候区划和区域农业气候资源开发利用

一、农业气候区划

如前所述，农、林、牧、水产各业与气候条件密切相关。而我国由于幅员辽阔，地形复杂，各地的农业气候条件存在着显著的地域差异。因此，为了更好地制定农业发展战略和长远规划，为了更科学地指导农业生产，有必要就农业生产与气候的关系进行区域划分。农业气候区划的方法是在分析、鉴定农业气候条件的基础上，遵循农业气候相似原理和地区分异规律，根据对农业地理分布、农业布局、农业生物的生长发育及产量形成有决定意义的分区指标系统，划分若干个等级不同的农业气候区域。进而根据各区农业气候特点，提出从气候着眼的农业发展方向和利用改造途径。

中国农业气候区划的分区系统由农业气候大区、农业气候带和农业气候区 3 个等级组成（见图 5.4.1 和表 5.4.1、5.4.2）。

（一）农业气候大区

反映大农业发展方向的基本差异。全国共划分为东部季风农业气候大区、西北干旱农业气候大区和青藏高寒农业气候大区 3 个大区。这 3 个大区的自然地理条件很不均衡，光热水组合状况和气候生产潜力差别也很大。东部季风农业气候大区季风气候显著，光热水资源丰富，雨热同季，光热水的组合匹配适宜于农业生产，气候生产潜力较高，属于农、林、牧、副、渔综合发展类型。但有季节性旱涝，气象灾害频繁。西北干旱农业气候大区太阳辐射强，日照时间长，但降水少，变率大，干旱突出，限制了丰富的光、热资源的利用，气候生产潜力不高。以牧业为主，

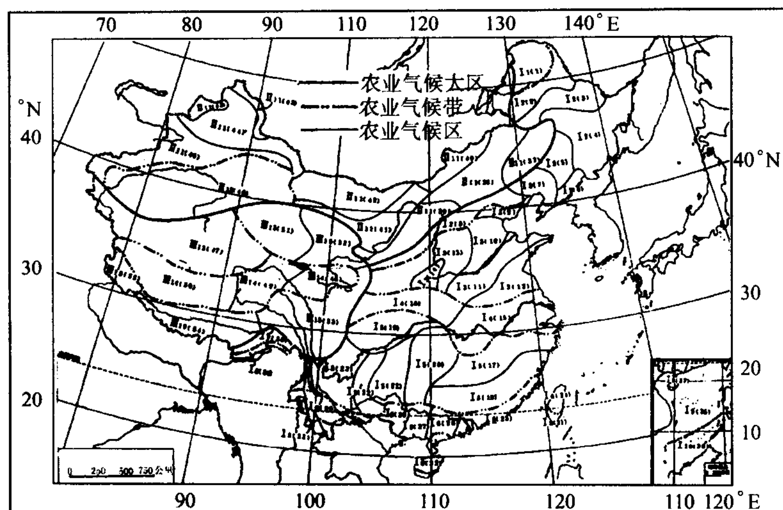


图 5.4.1　中国农业气候区划图

东部有少量旱作农业，西部内陆有灌溉绿洲农业。这两个大区之间一般可用年降水量 400 mm 等值线为分界线，但是，两大区之间实际存在着一个农业与牧业的过渡带，而该农牧过渡带的合理位置长期以来没有得到很好确定，农区界线不断北移，造成草原沙漠化，农业产量低而不稳，农牧业两败俱伤。究其原因，干旱和大风固然是主要的自然因素，而越区农垦则进一步造成了自然生态平衡失调，促使沙漠化程度加剧。因此，农牧过渡带的分析鉴定不仅是西北干旱农业气候大区与东部季风农业气候大区分界的主要判据，在全国农业发展战略布局中也居重要位置，同时还是三北防护林建设的重要地区。经分析，确定以年降水量≥400 mm 的出现频率 20%～50%地区为农牧过渡带范围。该过渡带的东南界是两大区的分界线。即以年降水量≥400 mm 出现频率 50%为分界主导指标，日平均风速≥5 m/s 的年平均日数 50 d(东段)，20 d(西段)为辅助指标，并具体考虑风蚀和水土流失情况。分界线由呼伦贝尔高原东部沿大兴安岭西麓，转向大兴安岭东南部的山前丘陵平原，经乌兰浩特、泰来北部、杜尔伯特、通榆、通辽、赤峰南部、围场、张家口坝上、大同、河曲西部、榆林、环县北部、固原北部、会宁北部至兰州南部。过渡带的西北界沿海拉尔偏西、锡林郭勒盟东部的农乃庙偏东、西乌、王盖庙、化德、乌兰察布盟后山丘陵、包头偏东、伊克昭盟中部偏东、盐池偏东、宁夏中部偏南至兰州北部。过渡带东段较宽，西段较窄。

青藏高原海拔高，热量显著偏低，限制了农牧业生产对光、水资源的利用。由于年平均气温低，≥0 ℃积温不到 3000 ℃，同时夏季温凉，最热月平均气温不足 18 ℃，农牧业生产均以喜凉耐寒品种为主。因此，以日平均气温≥0 ℃积温 3000 ℃和最热月平均气温 18 ℃为指标，并参照高原东部海拔 3 000 m 等高线划出青藏高寒农业气候大区的周界。

(二)农业气候带

农业气候带(二级区)，其界线划分以具有显著地带性的热量带及能够反映农业生产的种植制度为主，指标基本取≥0 ℃积温。但由于 3 个农业气候大区的农业热量条件各不相同，因此，具体划带指标又有所差别。东部季风区的农业气候带指标除积温外还考虑了越冬条件，青

藏高寒大区则选用最热月平均气温为辅助指标。

1. 东部季风农业气候大区

(1)北温带，≥0 ℃积温小于 2 100 ℃的地区为北温带。位于我国东北最北端，与前苏联的南泰加林毗连。只能种特早熟耐寒作物和耐寒树种。

(2)中温带北界，在北温带以南，以≥0 ℃积温 2 100 ℃为中温带北界，是水稻、玉米、大豆、甜菜等喜温作物的可能栽培北界。

(3)南温带北界，以年极端最低气温多年平均值－20 ℃(界线西段)或－22 ℃(界线东段)为主。辅助指标东段为≥0 ℃积温3 900 ℃、负积温－650 ℃，西段为≥0 ℃积温 3 600 ℃、负积温－500 ℃。该界线是冬小麦安全越冬北界(即小麦越冬冻害率≤20%)，并与以冬小麦为前茬的两年三熟的北界及苹果等南温带果树安全越冬的北界、棉花种植北界相近。

(4)北亚热带北界，以年极端最低气温多年平均值－10～－11 ℃、≥0 ℃积温 5 500 ℃(西段约 4 800 ℃)为指标。该界线为茶树、毛竹安全越冬的北界，还是稻、麦两熟最适宜区和双季稻可能种植的北界。界线以南生长常绿阔叶林，以北基本无常绿阔叶林。

(5)中亚热带北界，以年极端最低气温多年平均值－5 ～－6 ℃、最冷月平均气温 4 ℃，≥0 ℃积温 6 100 ℃(西段为5 900 ℃)为指标。该界线是柑桔适宜种植区的北缘和稻、稻、油(麦或绿肥)三熟制的安全北界。

(6)南亚热带北界，以年极端最低气温多年平均值 0 ℃、年极端最低气温－3 ℃出现频率≤5%、≥0 ℃积温 7 000 ℃(云南6 500 ℃)、最冷月平均气温 11 ℃为指标。此界线是龙眼、荔枝分布的北界，大叶茶、宿根甘蔗和秋植蔗安全越冬的北界。

(7)北热带北界，以年极端最低气温多年平均值 5 ℃、年极端最低气温 0 ℃的出现频率＜3%、最冷月平均气温 15 ℃，≥0 ℃积温 8 200 ℃(西段 8 000 ℃)为指标。此界线是典型热带作物(橡胶、胡椒)次适宜种植区的北界，双季稻、喜温冬作一年三熟的安全种植北界。

(8)中热带北界，以年极端最低气温多年平均值 10 ℃、最冷月平均气温 19 ℃、≥0 ℃积温 9 000 ℃为指标。此界线是橡胶、胡椒、可可等典型热带作物无寒害的北界。本带水稻可一年三熟，生产季节性不明显。

(9)南热带北界，以最冷月平均气温 25 ℃、≥0 ℃积温10 000 ℃为指标。此界线通过南沙群岛北部，是冬季风降温影响的南限，寒潮不能到达。本带各种热带作物都能生长。

(10)藏南亚热带，除上述各带外，在青藏高原东南边缘斜坡上包括云南云岭以西的滇西北和藏南在内的狭小区域内为藏南亚热带，气候垂直变化很大，基础带为南亚热带季雨林或亚热带常绿阔叶林，有水稻、玉米等作物及茶、竹、柑桔、香蕉等亚热带林果，局部还有一些热带作物和果树。带内≥0 ℃积温为 4 000～6 000 ℃，年降水量为 700～3 000 mm。

2. 西北干旱农业气候大区

只有干旱中温带和干旱南温带两个热量带，二者以≥0 ℃积温 4000 ℃为分界线。南疆和东疆为干旱南温带，其余均属干旱中温带。

(1)干旱中温带，≥0 ℃积温在 2 100 ℃～4 000 ℃，冬季寒冷，夏季较暖。东部部分地区处于农牧过渡带内。一年一熟，以马铃薯、春小麦、莜麦为主，少数还可种植玉米。其余为荒漠或牧区及少部分灌溉农业区。

(2)干旱南温带,≥0 ℃积温 4 000～5 700 ℃,夏季酷热。地处荒漠戈壁,无灌溉便无种植业。灌溉农业区内一年二熟或二年三熟,农作物为小麦、玉米、棉花及瓜果。

表 5.4.1 农业气候大区和农业气候带指标

农业气候大区		主导指标							辅助指标	
名称	指标	农业气候带	年极端最低气温多年平均(℃)	≥0 ℃积温(℃)	年极端最低气温出现频率(%) ≤-3 ℃	≤0 ℃	最热月平均气温(℃)	最冷月平均气温(℃)	负积温(℃)	农业特征
Ⅰ.东部季风农业气候大区(46.2%)	以年降水量 400mm 出现频率 50%为主导指标,以日平均风速≥5m/s 的年平均日数为辅助指标与Ⅱ区分界	Ⅰ$_{1}$北温带		<2 100			<16	<-30		一熟特早熟喜凉作物,以林为主
		Ⅰ$_{2}$中温带		2 100～3 900			16～24	-30～-10		一年一熟春小麦、大豆、玉米,林,牧
		Ⅰ$_{3}$南温带	-22(西段-20)～-10	3 900(西段 3600)～5 500(西段 4 800)					北界≥-650 西段≥-500	两年三熟或一年两熟,冬小麦为主,棉花、玉米、苹果、梨
		Ⅰ$_{4}$北亚热带	-10(西段-11)～-5(西段-6)	5 500(西段 4800)～6 100(西段 5 900)				0～4		稻、麦两熟和双季稻、茶、毛竹
		Ⅰ$_{5}$中亚热带	-5～0	6 100(西段 5 900)～7 000(西段 6 500)				4～11(西段 12)		一年三熟或两熟稻、稻、麦(油菜、绿肥)、柑桔、油桐、油茶
		Ⅰ$_{6}$藏南亚热带	0～5	7 000(西段 6500)～8 200(西段 7 500)	<5			11～15		双季稻-冬作物(喜凉或喜温)、一年三熟,龙眼、荔枝、甘蔗、香蕉、大叶茶
		Ⅰ$_{7}$南亚热带		4 000～6 000						立体农业明显,一年两熟,林,牧
		Ⅰ$_{8}$北热带	5～10	8 200(西段 7500)～9000		<3		15～19		一年三熟、双季稻-喜温冬作物,可种橡胶、咖啡、椰子
		Ⅰ$_{9}$中热带		9 000～10 000				19～25		全年可种喜温作物,橡胶适宜
		Ⅰ$_{10}$南热带		>10 000				>25		各种热作物均能生长
Ⅱ.西北干旱农业气候大区(28.2%)	见Ⅰ、Ⅲ区	Ⅱ$_{11}$干旱中温带		2 100～4 000						灌溉农业或旱作农业,一年一熟,春小麦、马铃薯,牧
		Ⅱ$_{12}$干旱南温带		4 000～5 700						灌溉农业,一年两熟,长绒棉、葡萄、哈蜜瓜,牧
Ⅲ.青藏高寒农业气候大区(25.6%)	≥0 ℃积温 3 000 ℃等值线并参照高原东部海拔 3 000 m 等高线与Ⅰ、Ⅱ区分界	Ⅲ$_{13}$高原寒带		<500			<6			无农业
		Ⅲ$_{14}$高原亚寒带		500～1 500			6～10			牧业为主
		Ⅲ$_{15}$高原温带		1 500～3 000			10～18			牧业为主,农、林、牧三位一体

3. 青藏高寒农业气候大区

需要特别提及的是 20 世纪 80 年代以来，我国农业生产的大环境已由计划经济转向市场经济，农业生产的重点也由单纯追求产量向产量和产品质量、效益并重的方向发展，走高产优质高效农业的发展道路。因此，新形势下的农业气候区划要对农业生产特点、农业经济结构、农业种植结构变化等内容进行深入调查研究，根据“两高一优”农业的要求，制作一些专题性的区划，如当地“名、特、优、新”农产品的最佳栽培区、适宜栽培区等，把当地气候资源优势转化为经济优势。另外，高效益往往伴随着高风险，特别是当前极端气候事件的频率有所加大。因此，结合农业生产需要，编制当地农业气候灾害的风险区划也是新形势下农业气候区划的内容。

(1)高原寒带，≥0 ℃积温小于 500 ℃，最热月平均气温小于6 ℃。全年无夏，气候严寒干旱，冻土广布，空气稀薄。不适宜人类永久居住。

(2)高原亚寒带，≥0 ℃积温 500～1500 ℃，最热月平均气温6～10 ℃。无夏，春、秋也很短暂。没有林业，也没有种植业，为纯牧业区。

(3)高原温带，≥0 ℃积温 1500 ℃～3 000 ℃，最热月平均气温 10～18 ℃。喜凉牧草能正常生长，适合发展畜牧业。种植业主要在部分水热条件相对较好的河谷，森林则集中分布于东南部地区。

(三)农业气候区

我国地形复杂，气候多样。因此，农业气候区的划分主要考虑非地带性的农业气候因素。其指标灵活性较大，因带而异，主要由影响各地区农业生产的主要农业气候特征来定。例如东部中温带地区由于热量资源不足，降水分布不均，故选用与作物布局关系密切的积温以及年湿润度、年降水量划分 7 个农业气候区。南温带降水变率大，水分亏缺明显，采用全年和春季水分供求差作为划区指标，共分 6 个农业气候区。北亚热带和中亚热带主要考虑春、夏湿润度和最热月气温，分别划分出 2 个和 7 个农业气候区。南亚热带和热带主要采用冬春干旱程度划分，各有 6 个农业气候区。西北地区的 10 个农业气候区划分采用年降水量、大风日数和积温。青藏高原则综合考虑冬、夏温度状况和降水量划分出 9 个农业气候区。

全国共有 55 个农业气候区(详见表 5.4.2)。

表 5.4.2 农业气候区

代号	名称	代号	名称	代号	名称
$\mathrm{I}_{1(1)}$	大兴安岭北岭北部区	$\mathrm{I}_{5(20)}$	湘西-黔东区	$\mathrm{II}_{11(39)}$	东胜-兰州区
$\mathrm{I}_{2(2)}$	博克图一呼玛区	$\mathrm{I}_{5(21)}$	黔中高原区	$\mathrm{II}_{11(40)}$	二连区
$\mathrm{I}_{2(3)}$	嫩江-小兴安岭区	$\mathrm{I}_{5(22)}$	黔西-滇东高原区	$\mathrm{II}_{11(41)}$	河套-河西区
$\mathrm{I}_{2(4)}$	松花江-牡丹江区	$\mathrm{I}_{5(23)}$	滇中-川西南高原区	$\mathrm{II}_{11(42)}$	阿拉善高原区
$\mathrm{I}_{2(5)}$	松辽平原区	$\mathrm{I}_{6(24)}$	台北-台中区	$\mathrm{II}_{11(43)}$	阿勒泰-塔城区
$\mathrm{I}_{2(6)}$	长白山区	$\mathrm{I}_{6(25)}$	粤中南-闽南区	$\mathrm{II}_{11(44)}$	准噶尔盆地区
$\mathrm{I}_{2(7)}$	辽西-辽南区	$\mathrm{I}_{6(26)}$	粤西-桂东南区	$\mathrm{II}_{11(45)}$	天山区
$\mathrm{I}_{2(8)}$	长城沿线区	$\mathrm{I}_{6(27)}$	桂中南区	$\mathrm{II}_{12(46)}$	塔里木-哈密盆地区
$\mathrm{I}_{3(9)}$	北京-唐山-大连区	$\mathrm{I}_{6(28)}$	桂西南区	$\mathrm{III}_{13(47)}$	昆仑山-北羌塘高原区
$\mathrm{I}_{3(10)}$	黄-海平原区	$\mathrm{I}_{6(29)}$	滇南高原区	$\mathrm{III}_{14(48)}$	东青南高原区
$\mathrm{I}_{3(11)}$	黄河下游南部区	$\mathrm{I}_{7(30)}$	藏南-滇西北区	$\mathrm{III}_{14(49)}$	西青南高原区
$\mathrm{I}_{3(12)}$	淮北-鲁东区	$\mathrm{I}_{8(31)}$	台南区	$\mathrm{III}_{14(50)}$	南羌塘高原区

(续表)

代号	名　称	代号	名　称	代号	名　称
$\mathrm{I}_{3(13)}$	黄土高原区	$\mathrm{I}_{8(32)}$	琼雷区	$\mathrm{III}_{15(51)}$	柴达木盆地区
$\mathrm{I}_{3(14)}$	关中平原区	$\mathrm{I}_{8(33)}$	西双版纳-河口区	$\mathrm{III}_{15(52)}$	青海湖盆地-祁连山区
$\mathrm{I}_{4(15)}$	长江中、下游区	$\mathrm{I}_{8(34)}$	藏东南边境区	$\mathrm{III}_{15(53)}$	川西-藏东高原区
$\mathrm{I}_{4(16)}$	汉水中、下游区	$\mathrm{I}_{9(35)}$	琼南-西、中、东沙群岛	$\mathrm{III}_{15(54)}$	藏南高原-喜马拉雅山区
$\mathrm{I}_{5(17)}$	江南丘陵区	$\mathrm{I}_{10(36)}$	南沙群岛区	$\mathrm{III}_{15(55)}$	藏西狮泉河区
$\mathrm{I}_{5(18)}$	南岭-武夷山区	$\mathrm{II}_{11(37)}$	科尔沁区		
$\mathrm{I}_{5(19)}$	四川盆地区	$\mathrm{II}_{11(38)}$	呼伦贝尔-锡林格勒高原区		

随着计算机技术的迅速发展和信息时代的到来，充分应用遥感技术、地理信息系统等高新技术，建立结构合理、自动化程度高、总体功能强的农业气候资源信息系统和区划制作自动化、成果表达可视化、平面与立体、时间与空间全方位配置的全新的农业气候区划，将把农业气候资源和农业气候区划工作提高到一个新水平，为合理利用农业气候资源，趋利避害减轻气候灾害影响，促进农业可持续发展作出积极的贡献。

二、区域农业气候资源开发利用

(一)东部季风区农业气候资源开发利用

东部季风农业气候大区位于我国东半部广大区域，面积占全国总面积的 46.2%，集中了全国耕地的 80%以上和人口的 90%以上。农业生产季节内(≥10 ℃期间)太阳辐射总量为 $10.5\times10^8\sim54.4\times10^8\mathrm{J/m^2}$，可以满足作物高产需要；≥0 ℃积温在2 000～10 000 ℃，有各种类型的作物、品种及不同熟制；年降水量在400～2 000 mm，可发展各种水、旱作物。雨热同季，光温水匹配较好，是全国农业生产气候潜力最大的地区，但气候灾害较频繁。农业气候资源呈纬向为主的地理分布规律。从北到南可分为温带、暖温带、亚热带、热带等几个农业气候带。从区域看，大致可分 6 大块地区。

1. 东北地区

东北地区大部分处于中温带。从南到北，由南温带向北温带过渡；自东向西，从湿润气候演变为半干旱气候。与此相适应，形成了农业、林业、牧业等多种农业结构。同时，夏季高温多雨，玉米、大豆等喜温作物在大部分地区均能种植。土地资源丰富，是我国重点商品粮基地之一。不利气候条件：生长季较短，热量资源不足，光资源利用受到限制，同时，东、西部地区水分资源的空间配置与热量、辐射资源匹配不够协调。气候生产潜力相对较低。热量资源不稳定，≥10 ℃积温多年平均变幅在±300 ℃或更多。夏季低温冷害平均 3～4a 出现 1 次，严重冷害 7～8a 1次，导致粮食产量不稳定。

利用农业气候资源的途径：合理利用森林资源，加强草原建设，改善森林和草原生态系统。以气候资源为背景，考虑高产、稳产及经济效益最优原则，合理调整种植业结构。根据不同品种对热量的要求、各地积温保证率及不同品种成熟度造成的减产程度，进行品种合理布局，以减轻低温冷害影响。利用薄膜育秧等措施，采取适时早育秧、早播种、育苗移栽等措施，以提高春

季热量资源的利用率。辽东半岛位于南温带北缘，盛产南温带水果，应充分发挥这一气候优势，建成优质高产基地。

2. 黄淮海地区

黄淮海地区大部分属南温带半湿润易旱地区，西部部分地区为半干旱气候。农业气候资源兼我国南北所长。光资源较丰富，热量资源可满足一年两熟，水资源居中，是东部季风区中潜力较大的农业发展战略重点地区之一。突出的农业气候特征是雨热同季显著，旱涝灾害特别是春旱发生频繁。

光热资源丰富，雨热同季突出　除北部少数地区外，热量均可满足以冬小麦为前茬的一年两熟的要求。全年降水量不够充沛，但80%～90%集中于日平均气温大于10 ℃的作物生长季节内，特别是6～8月降水量占全年的50%～60%。此外，由于生长期较长，农业所能利用的辐射总量比西北、东北、青藏高原等地高得多。农业气候生产潜力较大。

水分亏缺　旱涝灾害频繁春旱频繁，大部分地区夏收作物严重缺水。特别是河北中部、东部及山东西北部4～6月降水仅40～60 mm，小麦全生育期水分亏缺达200 mm以上。水分不足大大限制了光热资源的利用。另外，降水变率大，多雨年往往出现涝害。

黄淮海地区农业气候资源利用中的主要方向和对策是推广节水型农业，提高水分利用率。

推广优化灌溉技术。华北地区小麦生育期内灌5～6次水的传统灌溉制度不切合华北水资源的实际，同时也忽视了麦田底墒的作用、小麦不同生育期耗水量的差异及水分亏缺对产量影响的差异。华北地区小麦优化灌溉方案研究指出，在底墒充足的年份拔节期水分基本可以满足，孕穗后期水分供不应求，需要灌水。一般气候年份灌1～2次水可获300～350 kg/hm^2；生产水平高的地区灌3次水可获400～450 kg/hm^2。

推广有机旱作农业，提高施肥水平，以肥调水，提高土壤蓄墒能力，进一步提高水分利用率，增加产量。按照水分资源规律种植作物，黄河以北地区只能在热量条件能满足，又具备灌溉条件的地区才能发展小麦-玉米两熟制。旱地应以秋作物为主。

3. 长江中下游地区

长江中下游地区是我国农业气候资源比较优越的地区。热量条件较优越，雨热同季时间较长，农业生产潜力很大。受冷空气影响，部分年份有春、秋、冬季低温，分别造成水稻烂秧、晚稻寒露风灾害及亚热带经济作物冻害。降水充沛，但伏旱、洪涝频繁。伏旱出现频率约90%，限制了丰富的光、热资源的利用，对水稻产量影响很大。春涝或春、夏涝易导致小麦赤霉病发生；春涝伴随低温阴雨常造成早稻烂种烂秧；夏、秋涝可解除伏旱，但大风暴雨对水稻抽穗、扬花和棉花吐絮影响极大，严重时危及农田水利设施及人民生命财产安全。山区气候垂直变化明显。长江中下游地区丘陵山区面积占3/4，气候、土壤、植被随海拔、坡向而异，形成不同的生态环境，为农林牧综合发展提供了优越条件(详见本章第三节)。

利用农业气候资源的主要方向：合理利用农业气候资源，发展高产优质高效农业种植类型和方式、作物选择、品种搭配等均应扬长避短，与当地周年气候相适应。当前农村对产业结构调整、发展优质、高效农业的要求日益迫切。需要调查研究作物优良品种的气候适应性及合理栽培技术。发挥各地气候优势，促进农林牧副渔各业全面发展。平原地区在合理利用优越的光、热、水资源的同时，要加强水利建设，提高排灌除涝抗旱能力。河湖水面应采取积极措施，保护和合理利用，积极发展水产业。

亚热带山区为多层次的农业气候生态类型，应发展亚热带经济林果和畜牧业，实现商品生

产。还可利用离城市较近的山区夏季冷凉气候，发展夏令蔬菜，保证城市蔬菜均衡供应。

4. 华南地区

华南地区地处南亚热带和热带，降水量充沛，雨热同季时间长。热量可满足一年三熟，冬季温和，可种喜温作物，农业生产潜力很大。主要农业气象灾害为冬、春干旱、晚稻秋季低温及沿海台风暴雨危害。另外，南亚热带南部和北热带北部的橡胶、胡椒等热带作物冬季偶有寒害。

进一步发挥气候生产潜力的主要途径：发展高产优质高效农业。应建立更充分利用光能，更合理利用土壤、水资源，并有较高经济效益的种植制度。建立考虑农林牧副渔各业综合发展，多层次、高功效的生态系统。利用冬暖优势，建立蔬菜、花卉商品生产基地。

5. 西南地区

西南地区地处中低纬度，地貌复杂，气候多样。主要农业气候特征为冬季温和，夏无酷暑，对小麦、油菜等作物的越冬和亚热带经济林果生长十分有利。除四川盆地外，西南多数地区夏少酷暑，可使作物免受高温危害。但另一方面，温度强度不够对作物光合作用不利，并常导致水稻生育期推迟，后期遭受低温冷害。光照不足，辐射量小，但大春作物生长期间(4～9月)日照、辐射较多，基本可满足需要。散射辐射比例大，适于茶叶、烟叶和林木生长。降水较充沛，但地区、季节差异明显。年内干湿季节分明，春旱和夏、秋涝常给农业生产带来很大影响。

农业气候资源的开发潜力很大，发挥气候资源优势，可大大促进农业综合发展。如西南地区冬暖春早，种植油菜可充分利用这一优势。四川盆地、湘西、黔东等地及长江沿岸浅山丘陵地区冬季温度很适应甜橙类柑桔越冬，应大力发展，增加收入。

利用云雾多，日照少，辐射量小的气候特点，大力发展茶叶、烤烟等喜阴作物和林业生产。克服不利气候条件，争取农业稳定发展。春旱、伏旱、夏、秋洪涝等自然灾害交替出现，对农业生产威胁很大。只有根据气候特点，趋利避害，调整种植制度，才能使农业高产稳产。四川盆地改双季稻为中稻，盆地东部适当压缩冬小麦面积，改种更为适宜的油菜等。利用山地农业气候资源优势 充分利用山地各种有利地形和资源优势，因地制宜发展中药材、土特产、经济林果，使农林牧副渔各业综合发展。注意搞好山区水土保持和水源涵养，建立良好、稳定的生态系统。同时，加强自然保护区建设。

6. 黄土高原区

在气候上具有从东南季风气候向西北干旱气候过渡的特征。既有光能资源丰富，气候温和的优势，又有少雨、多风、降水强度大的劣势。大部分地区为黄土高原丘陵沟壑，土壤侵蚀严重，生态环境脆弱。主要气候特征：光能资源丰富生长季内的太阳辐射比东部平原多10%～20%。东南部属南温带气候，气温日较差较大，比东部同热量地区高0.5～2.5 ℃。这种热量条件与光照条件相结合，对作物获得高产和优良品质十分有利。降水量主要集中在夏季，特别是7～8月。由于温度高，风大风多，空气干燥，蒸发加大，因此，水分亏缺仍十分严重。

应围绕生态环境建设进行农业气候资源的开发利用，以蓄水保墒为中心措施，促进粮食增产 。一方面适应扩大耐旱秋作物面积；另一方面，从蓄水墒，伏雨春雨秋用，提高水分利用率入手。利用当地气候资源优势，发展优质瓜果生产。种草植树，改善生态环境 。根据降水量分布规律，黄土高原北部和西北部为农牧业过渡带，应以种草为主，草灌结合。过渡带南半侧为三北防护林重点地区，树种选择应乔灌结合。加强风能、光能资源的利用。

(二)西北干旱区农业气候资源开发利

西北干旱农业气候大区位于我国北部和西北部，虽有充分的光照和夏季较温暖的条件，但

年降水量已接近或低于旱作农业所需降水量的下限，没有灌溉的地区为草原、半荒漠草原和沙漠戈壁。河套、宁夏、河西走廊、新疆石河子等有高山降水、冰雪融化和水利灌溉的灌区，优越的光热条件与水利灌溉相配合，成为农业发达的“塞上明珠”或“戈壁绿洲”。

由于地处内陆，既有干旱多灾的资源劣势，同时又有其特殊的资源优势。

1. 农业气候资源优势

太阳辐射强，日照时间长，光质好。年总辐射量在 50.2×10^8～67.0×10^8 J/m²，全年日照时数为 2 800～3 200 h。丰富的光资源既利于光合作用，又在一定程度上弥补了热量的不足。此外，由于太阳光合有效辐射多，光质好，加上气温日较差大，十分有利于光合物质的积累和优良产品品质的形成，对发展优质商品生产十分有利。积温有效性高。春季升温快，夏季温度高，温度日较差大。在有灌溉条件的地区，丰富的光、热资源得以充分发挥，积温有效性较高。风能资源丰富。全年日平均风速≥5 m/s 的天数在 50 d 以上，北部多达 80～120 d，甚至 200 d 以上。大风可为农牧业生产和牧区人民生活提供风能和电能。但在干旱、半干旱地区大风与下垫面的沙质、疏松土壤类型相结合，风蚀沙化十分严重。

2. 农业气候资源劣势

降水少，变率大，季节分配不均。年降水量由东部 400 mm 向西迅速递减，西部吐鲁番等地年降水量不足 25 mm。降水量年际变化很大。年降水变率为 30%～40%，更甚者高达 40%～50%。年内各季降水量差异大，夏季降水量占全年一半以上，冬、春季只占 15%～20%。春旱严重，影响春播作物出苗，牧草返青推迟。由于降水量少，地表蒸发量大，因而降水利用率很低，农田水分亏缺严重。

气候灾害较多。除了干旱灾害以外，大风、低温冻害、冰雹、雪灾、干热风等自然灾害均对西北地区的农林牧生产造成不同程度的危害。

把农业气候资源优势转化为经济优势的途径：合理利用水资源。加强灌溉管理，发展节水农业，减少无效蒸发。严格保护水源涵养林。利用农业气候资源优势，促进农林牧副业综合发展。充分利用有利条件，实行合理的种植制度，间作套种，力争提高单产。在发展平原绿洲的粮食、经济作物的同时，还要充分利用气候优势和人工灌溉条件，大力植树，注意发展农区畜牧区。扬长避短，发展草原季节畜牧业。顺应气候季节变化规律，以草定畜，超载家畜当年屠宰。在农牧过渡地带发展育肥饲养畜牧业，促进农牧业同时发展。

（三）青藏高寒区农业气候资源开发利用

由于地势高亢，气候寒冷，青藏高原形成独特的农业气候大区。这里光资源非常丰富，但热量明显不足，西部水分欠缺。大区内以放牧畜牧业为主，农业主要集中于水热条件相对较好的一江（雅鲁藏布江）两河（拉萨河、年楚河）和黄（河）湟（水）谷地。东南部地区温暖湿润，有大面积生长良好的森林。

1. 主要农业气候特征

太阳辐射能丰富。年总辐射为 58×10^8～87×10^8 J/m²，远较东部地区的 46×10^8～53×10^8 J/m² 多，是我国光资源最丰富的地区，对林木、作物的高产及作为能源的利用非常有利。温度低，热量不足。年平均气温－6～3 ℃，最热月平均气温不到 18 ℃。基本没有绝对无霜期。≥0 ℃积温小于 3000 ℃，西北部地区约 1/4 面积为高原寒带，积温不到 500 ℃，日平均气温≥0 ℃日数仅 100 d 左右。中西部地区 1/4 多面积为高原亚寒带，≥0 ℃积温500～1500 ℃，气候寒冷，为纯牧区。南部、东部和东北部地区为高原温带，年≥0 ℃积温 1500～3000 ℃，喜凉的牧

草、林木、作物、蔬菜、瓜果可生长。农林牧业集中分布于这一地区。水分状况差异悬殊。从藏东南向藏西北气候由湿到干。藏东南受西南季风影响，年降水量多达 3 000～5 000 mm，有热带雨林、季雨林分布；雅鲁藏布江河谷为 400 mm 左右；西北部的羌塘高原和柴达木盆地水汽难以抵达，年降水量不到 100 mm。

2. 发展青藏高原地区农业生产，要从其特殊的气候规律出发，全面均衡地发展牧、农、林各业

顺应气候规律，发展畜牧业。受水、热资源的限制，青藏高原畜牧业生产为区内主导产业，草地面积占全国草地面积的 42%。该区草地类型多样，草质较好，但产草量低。且由于草地超载，草场退化，加之草地生产的季节性及自然灾害，青藏高原畜牧业仍较落后，商品率很低。为促进畜牧业发展，应大力加强草地建设。中西部面积大，产草量低的地区，应完善分场放牧制度，开辟扩大夏牧场；中东部条件较好的地区，要注意发展网围封育和扩大草地灌溉。水热条件更好的农区和半农半牧区应推广人工种草和草田轮作。

发挥光温优势，提高农作物产量。由于温度较低，农区作物生育期延长，对小麦幼穗分化，籽粒灌浆和有机物积累比较有利。加之辐射强，日照多，作物光合速率高。因此小麦单产潜力大，有全国最高的小麦单产记录。充分利用这一气候优势，选育优良品种，加强水肥管理，喜凉作物产量还可提高，力争做到粮、油等农产品自给。但由于小麦灌浆期温度不高，同时导致品质较差，农业结构调整中应适当注意。

利用太阳能、风能，解决能源不足。充分利用区内丰富的太阳能、风能资源，大力兴建太阳灶、太阳能采暖房、热水器及小型风力发电机，既缓解生活能源短缺，又可减少对牛粪、草木、作物秸秆的需求，逐步改善生态环境。

第五节 气候异常和气候变化对农业的影响

一、气候异常和极端气候事件

农业对天气气候变率非常敏感。在全球气候变化中，极端天气气候事件频率正逐渐增加。世界上许多地区出现的极端天气事件给农业生产带来了极大的负面影响。特别是近几年许多地区发生一些严重的事件，诸如洪水、热带气旋、干旱及其他气候灾害。例如 1997～1998 年的厄尔尼诺事件就给世界上不同地区的农业造成严重损失。

厄尔尼诺现象是一种太平洋东赤道海域表面海水异常增温的现象，它引起大规模的海洋和大气相互作用，对热带地区气候产生直接影响。1997～1998 年上半年的厄尔尼诺现象造成 1997 年南太平洋东部暴雨频繁，洪涝成灾。其中智利北部暴雨倾盆，6 月份两天的降雨量与过去 20 多年的总降雨量持平。引起山洪暴发，房屋和农田被毁，上百万人无家可归。东非地区降雨量比常年多5～10 倍，引起牲畜和人员伤亡，农作物遭受毁灭性损失。另一方面，南非、巴西东北部、印度尼西亚、澳大利亚和地中海地区遭受严重干旱。其中印度尼西亚发生了半个世纪以来的最严重的干旱，农业减产，9 万多人食物严重短缺。长期干燥气候引发大范围森林火灾，使当地经济受到沉重打击。据估计，这次厄尔尼诺现象是本世纪最强的一次，在全球造成的经济损失至少在 130 亿美元以上。

厄尔尼诺事件对我国气候的影响一般是间接的。例如，暖冬凉夏、北方干旱、南方洪涝、热

带风暴和台风登陆个数偏少等等。但 1997～1998 年我国东北夏季出现罕见高温天气。这说明我国气候成因复杂，厄尔尼诺与我国气候的关系比较复杂。

与此同时，太平洋赤道东海岸表面海水温度明显低于平均温度时又会发生拉尼娜现象，这也是全球气候系统异常的一个强信号。其发生时对热带大气环流及热带以外地区的大气环流造成很大影响。厄尔尼诺现象和拉尼娜现象造成的异常气候无疑对充分合理利用气候资源，发展可持续农业非常不利。因此，应及时监测厄尔尼诺和拉尼娜的发生和发展过程，不断提高预报水平，为农业生产制定规划，趋利避害，防御自然灾害作出贡献。

二、人类活动影响的气候变化

人类活动引起的大气中温室气体含量增加及其导致的气候变化问题已成为全球性问题，愈来愈引起各国政府和人民的关注。农业作为国民经济中的一个脆弱部门，势必首先受到冲击。据估计，到 2030 年，大气中各种温室气体的总影响可能达到相当 CO_2 浓度增加 1 倍的程度。温室气体含量的增加，除了对农业生物产生直接效应外，还可能导致气候发生不可逆转的变化，进而对农业产生间接影响。

未来的气候变化将以温度升高为先导，伴随降水、土壤有效水分的变化以及极端气象事件发生频率的变化。

大于一定界限温度的积温及其持续日数是评价一地热量资源多少的重要指标之一。CO_2 浓度升高引起气候变暖，无疑将使中高纬度地区的农业气候资源变得更加丰富。例如积温增多，农作物生长季延长，低温冷害和霜冻缓解或减轻。这些将导致农业种植界线向极区和高度上界移动，中高纬度地区农业将明显受益。

关于 CO_2 倍增时我国≥0 ℃积温，≥10 ℃积温变化的研究结果表明，$2\times CO_2$ 时我国≥10 ℃积温平均将增加 15%左右，≥10 ℃持续日数和无霜期可增加 30d（天）。另外，东北地区夏季气温将升高 2.4 ℃，积温增加 200 ℃以上，这将使东北夏季低温冷害的影响有所减轻。

通常以积温为主要指标划分熟制。有研究根据气候变化对热量资源的影响，分析我国熟制对气候变暖可能的响应。研究指出，CO_2 倍增时，两熟区将北移到目前一熟区的中部，目前的两熟区大部分将被各种不同组合的三熟制取代，三熟制北界将由目前的长江流域北移到黄河流域，约移动 500 km。三熟制面积可能扩大 1.5 倍，一熟区将缩小 23%（图 5.5.1，图 5.5.2）但是，该研究指出，尽管估计降水将有所增加，但温度升高时蒸发加剧，降水蒸发差可能为负，土壤有效水分将会变小。

气候变化时我国水分资源也将明显变化。据分析，多数 GCM 模式预测我国降水量将呈增加趋势。其中夏季降水除黄河中下游和武汉外，其他地区均有所增加。冬季渤海沿岸和华南降水将减少，其余地区增加。$2\times CO_2$ 时我国各地蒸发率加大，其中北方冬季增加 10%左右，夏季 18%。南方冬季增加 4%，夏季 10%左右。据 GCM 模式估计，$2\times CO_2$ 时我国大部分地区的土壤、水分为减少趋势，其中华北平原减少最明显。另据估算，黄淮海地区 $2\times CO_2$ 降水增加时，冬、春季土壤水分将减少 1%～－6%，夏季增加1%～7%。降水减少时全年和各季土壤水分含量都减少，夏季 8%以下，其余各季 15%以上。

土壤水分减少对农作物生长不利。水资源短缺的华北地区将更为明显。据研究，气温升高时将因蒸发变大而导致华北地区冬小麦水分亏缺程度加剧。这种响应以华北冬麦区北部和西部尤为明显，时间上则以小麦拔节、抽穗阶段更为突出。气温升高 1.5 ℃时各地全生育期水分

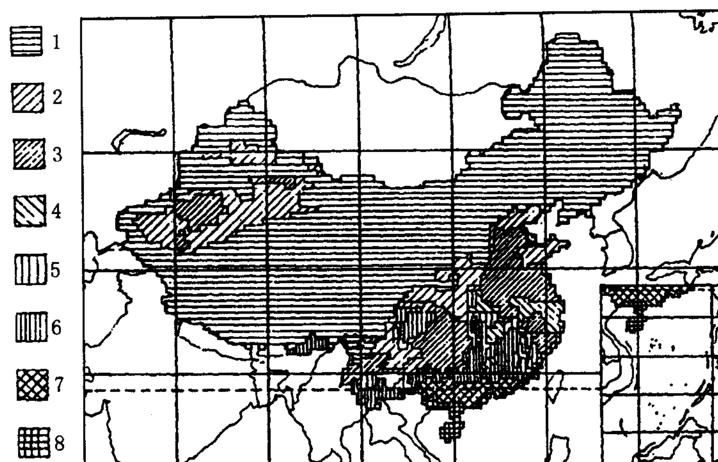


图 5.5.1 当前气候下(1951～1980年)我国熟制的分布

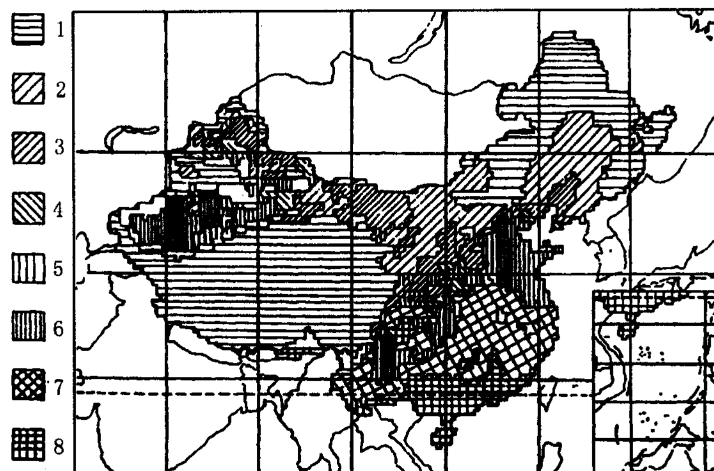


图 5.5.2 2050年气候情景下我国熟制的分布

亏缺量将比当前气候增加 30～50 mm，约 14%～30%，亏缺量－300 mm 和－250 mm 等值线明显南移，西段南移达 140～190 km(图 5.5.3)。水分亏缺量加大使华北地区冬小麦水分胁迫严重的地区扩大，水分不适宜区范围向南扩大，适宜区缩小。全生育期水分亏缺加剧引起的小麦减产值比当前气候下大 8%～20%。灌溉额将增加 25%～33%，使生产费用提高。

因此，可以认为，气候变暖可能使农业热量资源增加，种植界限北移。但华北地区温度升高后水分亏缺程度可能加重。在有灌溉条件的地区，冬小麦可能增产，但灌溉增加将使生产成本提高。而在没有灌溉条件的地区，水分胁迫加剧则将导致减产。这些变化对华北地区目前的两熟制农业持续发展十分不利，更对三熟制的北移构成极大限制。因此气候变暖时热量、水分资源都会发生相应变化和不同组合。热量资源增加的正效益甚至有可能被水分不足所限制或抵消。在分析气候变化对农业影响时，应综合考虑热量资源和水资源的匹配组合情况以及生产费用的变化。需要指出：

图 5.5.3 温度升高 1.5 ℃时冬小麦全生育期水分亏缺量等值线南移

1. 在全球变暖的总趋势和大背景下，我国气温的变化与北半球变化基本一致，但时间和空间分布上仍存在一定差异。例如，20 世纪 80 年代增温远不如北半球激烈。即使在中国，各地气候变化情况也不同。对于中高纬度地区，例如光水资源丰富、热量资源不足的东北地区，气候变暖具有潜在的开发意义。若按提高复种指数 5%计算，可增加 5×10^6hm^2 耕地气候资源的二次利用，年均增产粮食约 2×10^{10}kg。但是在研究气候变暖的进展动态及其对现有种植熟制的可能影响幅度时，应结合光水资源的波动评估其综合生产潜力及其开发可能性，同时应有风险意识，警惕变暖趋势中出现低温的可能性。东北地区 20 世纪 80 年代以来的"变暖"主要表现在冬季偏暖。而据 1986～1995 年的气候资料分析，作物生长期内的严重冷害和一般冷害在不同地区仍时有发生。另外，大量使用晚熟品种等人为原因，也会加重冷害的影响。一些地区因熟性北移，造成玉米不能正常成熟，籽粒淀粉含量下降，影响品质。从全国来看，有些地区如西南地区甚至有变冷的现象。因此不能一概而论。在农业生产中不能附和"气候变暖"而盲目引种或扩种喜温喜热作物，或盲目增加中、晚熟品种。

2. 对热量资源丰富的地区而言，气温升高甚至会产生一定负效应。例如南亚热带地区的福建热量的有效性将变差，双季早稻的高温逼熟愈加突出；双季晚稻的夏、秋旱因某些时段的水分紧缺而更加严重；冬暖对一些果树的花芽分化不利，影响产量。此外，气候变暖还导致病虫害代数增加，虫源扩大，食量增大，危害加重。

3. 平均状况和极端情况应有所区别。如福州 1991 年 12 月前中期气候明显偏高，月平均温度比常年高 1.1 ℃。但该月 27～29 日受强寒潮影响，极端最低气温达建国以来最低值，香蕉、龙眼、荔枝等果树大批受冻害。因此平均气温的升高有可能掩盖了短暂的极端低温的存在，而后者往往是多年生经济作物生死存亡的关键。

另外，气候变率及极端气象事件的影响不可忽视。未来气候变化引起的平均温度和降水量的变化很可能会导致极端气象事件发生频率的变化。如高温热害日数增加，洪水、暴雨及干旱频率增加，高温和干旱结合等。据研究，在美国的玉米带依俄华，平均温度升高 1.7 ℃，出现连

续 5 d 最高温度超过 35 ℃的概率可能会增加 3 倍。3 月份的降水量减少 10%，将使降水量小于 25 mm 的概率提高 46%。这意味着因干旱减产的概率增加一半。在GISS 2×CO_2模式情景下，美国佐治亚州温度可能降到冰点以下的日数从 39 d 减少为 20 d，而高于 32.2 ℃的日数将从 17 d 增至53 d。

在我国，连续出现暖冬的近十多年中冬、春季霜冻也时有发生。1995 年全国冬小麦霜冻受灾面积达 28×10^5hm^2。1996 年 2 月南方出现严重霜冻，广东地区农作物受害经济损失达 30 亿元。

超过农作物生长发育所能忍受的高温、低温、干旱等极端气候异常事件的频率的增加，将对农作物直接产生不利影响，使农业生产的风险变大。这些都是评价气候变化对农业影响时所不能忽视的。

第六章 人体健康与气候

人体健康与气象有广泛和密切的关系。气象影响健康的机理和疾病发生的气候背景和天气条件,属于环境卫生学、流行病学和应用气象学的分支医疗气象学的共同研究范畴。

第一节 气象对健康影响的机理

一、气象对健康广泛而复杂的影响

(一)气象影响的广泛性

不同时间尺度的大气现象、天气过程和气候变化对健康都有影响。最短促的大气现象,剧烈的如闪电、打雷,足以使人伤残,甚至致人于死地;轻微的如乱流,会传播花粉或尘埃使有些人的呼吸道产生过敏反应。漫长的气候变迁,过去的如第四纪后期冰川的退缩,为现代人的形成和发展提供了条件,未来的如全球变暖,将影响全人类的生活起居和社会经济。下面说明不同时间尺度的气象对健康的负面影响。

从几秒钟到几小时的猛烈的大气现象或天气,如雷电、冰雹、暴雨、狂风、温度急降等,都给人体以物理冲击,造成伤害。这些现象主要是“中、小尺度天气系统”和强烈对流天气单体如飑线、雷暴高压、龙卷风和积雨云等所造成的,有的是天气尺度天气系统如冷锋所带来的。它们的水平范围不超过几十公里,生命史多数不超过几小时,但是系统的垂直发展旺盛,气流猛烈。

一天至几天的天气如酷热、严寒、冰冻、暴雨和狂风等,除了给人体以物理冲击外,还造成恶劣的环境,挑战甚至破坏人体正常的生理机能,引起或加重伤病。这些天气主要是由水平范围从几百公里至几千公里,生命史为几天的“天气尺度天气系统”如气旋(低气压),反气旋(高气压)、锋面、低压槽和切变线等所带来的。它们整个过程的天气没有前一类短时天气那么强烈,但镶嵌在天气尺度系统里的中、小尺度天气系统仍会造成暴烈天气。

几天以至十几天的绵连阴雨,连续暴雨,热浪,干旱,寒冷等持续恶劣天气,给人体直接造成损害,或造成恶劣环境,破坏人体正常生理功能,引发疾病或使原来潜伏的疾病发作或加重。这些天气是在某种行星尺度天气系统(如副热带高压)稳定控制下,一些天气过程或天气系统组合出现而造成的。

半个月以上的天气,如果着重考虑它的总和或平均情况,而不注重它的短期变化,就称为气候。一定的气候条件,是病原体(细菌,病毒和寄生虫等)及其传染媒介(蚊,蝇,蚤和虱等)的生存条件和生活环境。正常的气候和异常的气候都对疾病发生影响。季节是一年内气候的正常周期变化。大多数疾病有季节性,是疾病受正常气候影响的证明。如登革热总在夏季流行就是因为其传媒(蚊子)在高温多雨季节才繁殖和活跃。某些疾病则在异常的气候下流行。如越南某地区在异常干旱(月雨不足 100 mm)之后大约两个月,就有鼠疫流行,而且发病率与干旱时期的雨量成反比:雨量越少,发病率越高。这是因为干燥气候中鼠疫杆菌在家鼠或其他齧齿

类动物中得以蔓延，带有老鼠身上的鼠疫杆菌的跳蚤叮咬人体而传染鼠疫。又如，贵阳 1957 年 2 至 3 月气候异常冷湿，与正常年份相比，2 月平均气温低 5 ℃，全月降水日数多 6 d，日照时数少 22 h。3 月上旬仍然维持这些特点。从 2 月 7 日至 3 月底，感冒大为流行，发病者达 4 万余人。持续这样长的阴冷气候，是因该地一次又一次地处在静止锋的冷空气一侧，气温较低，而上空是锋面的连续云层，连绵阴雨。持续时间越长的天气系统，笼罩的范围也越大。这次控制贵阳的天气也覆盖四川，使重庆在同一时期也发生流感。季节气候异常的表现是多种多样的。各种气象要素（气温，降水，湿度，气压等）的多种组合，出现复杂的气候异常，对人体及其他生物产生不同的影响。

某种气候现象或气候事件相隔若干年重复出现，称为气候循环变化。厄尔尼诺现象是一种气候循环变化，平均 4 a 出现 1 次，但可能短到只间隔 1 a，或长到间隔 10 a 以上才出现 1 次。某个气象要素，如温度，在其平均值的上下波动，波动的周期不固定，为十几年至几十年，称为气候振动。气候循环和气候振动这两个术语没有明确的界定。它们表现为气候异常，对人体健康有影响，如南方涛动（热带太平洋区气压和热带印度洋区气压的升降呈反相关的振荡现象）在澳州东南部造成的淫雨和洪涝，使传染脑炎的蚊子的种群剧增，造成严重损害患者大脑的穆雷山谷（Murray Valley）脑炎的流行 。这种关系是如此密切，以至于利用“南方涛动指数”能预测脑炎发生的概率。季节气候异常也是气候振动的组成部分。

长达数十年以至数亿年的气候逐渐变化称为气候变迁。气候变迁及其中包含的气候振动对某些疾病的地理分布和发病时期（季节）有重大影响。从古气候考证，两万年以来（即第四纪大冰期以后的冰后期），地球渐渐变暖，疟原虫及其引起的疟疾才由非州扩展到欧洲南部。

气象变化如按时间尺度可排列如下：气候变迁——气候振动（或气候循环）、——年际变化——年变化（或季节变化）——行星尺度天气——天气尺度天气——中、小尺度天气——气象脉动。长者包含短者，短者组成长者；有些长、短时间尺度系统之间的过渡是模糊的。每种尺度的气候或天气，都对人体有影响。

（二）气象影响的复杂性

气象对健康影响的机理很复杂，包括直接影响（往往是急性的）和间接影响（往往是慢性的）。

直接影响例如太阳辐射，大气环境和暴烈天气对人体的物理影响。有些机理比较浅显，如强烈的紫外线会使皮肤产生红斑，在辐射的长期作用下会引起皮肤癌，严寒造成冻疮甚至冻僵，寒冷刺激某些器官充血，或加强神经的兴奋，热压迫引起热病和热促疾病，包括中暑、虚脱等。有些机理虽不明朗，但根据人们已有的知识能够解释，或从经验能够理解，如关节炎患者天气变化时关节痛，炎热时心血管病人死亡数显著上升，人体器官或组织对气压、风和重力波有反应，严酷天气对免疫力和新陈代谢有影响，心血管和内分泌对冷热有反应等。有些影响的机理则不甚了解。

间接影响主要是气候对病原体，生物性传染媒介，非生物性传染媒介和宿主的生存条件、繁殖环境、活跃程度和生命周期的影响。气候是决定某些疾病的地理范围、高发季节和流行时间的主要因子。气候对疾病的间接影响的有些机理已经明晰，如热带潮湿地方多蚊子，肆意地传染疟疾。科学家已经把蚊子的生命过程与环境条件的关系建立起定量的数值模式，只要对模式输入环境条件的数据，便可预测蚊子的发育过程，种群的规模和传染疟疾的潜在力。有些疾病或生理现象，人们估计它与气象有关，但很难加以证实，更不明其机理。如对近 15 万例精神

分裂症患者的统计发现,他们以冬季和早春出生者为多。对此,有人作了推测:冬季出生的人,前6个月胎儿大脑皮层正在分化,恰逢夏季,而夏季中任何代谢过程的紊乱可能使胎儿的大脑皮层发育受到严重障碍。这只是推测,类似的许多问题还有待确证和研究。广义的气象对健康的间接影响,还包括气候对水中生态环境的影响,使传染疾病的水中传媒的情况有所改变,气候通过对农业、森林的影响而影响社会的经济和人的营养和健康水平,天气通过大气污染影响人的呼吸系统和循环系统等等。

二、气象对人体的物理-生理影响

(一)个别气象要素对健康的影响

1. 温度的影响。人体为了保持一定的体温,具有产热和散热的机制。人体基础代谢产生的热量可使人体每小时上升2℃,所以人体要不断地通过辐射、传导、对流和蒸发来散热。如果环境温度超出人体所能适应的范围,人体就不能维持正常体温,将影响多种生理机能。

高温的影响。血管舒张,中枢神经系统机能障碍,使神志不清;蒸发散热而大量出汗,使体内失水;血液循环加快,如果心脏和血管舒张调节功能不足,就出现循环衰竭,使血压下降;失水失盐导致电解质平衡紊乱,使肌肉痉挛;引起中暑或其他热病和热致病;中枢神经兴奋,内分泌加强;酶的活性增加,蛋白质和碳水化合物的分解加速,耗氧增多。

寒冷的影响。使血管末梢收缩,血压升高;副甲状腺功能降低;肾上腺皮质功能活跃;毛细管抵抗力增加。寒冷初期使中枢神经兴奋和功能亢进。长时寒冷使各种兴奋下降,代谢减缓;呼吸心率减慢;肌肉僵直;血液粘性增加,循环障碍;血压下降;反射消失;关节滑液粘度增加,活动不便;造成冻疮、冻伤,甚至冻僵。寒冷而干燥的空气使鼻粘膜发生细小的皱褶或破裂,病菌容易侵入。

2. 湿度的影响。高温时如相对湿度大,会减少人体的蒸发散热,感觉闷热。低温时如相对湿度大,空气中的水汽会吸收人体的热量,感觉寒冷。

3. 气压的影响。气压剧烈变动产生的重力波使病人和敏感的人感觉不适。

4. 风的影响。风有助于人体散热。高温时有风感到凉爽。低温时有风感到寒冷。强风引起精神兴奋。

5. 冷锋的影响。伴随冷锋过境,急剧地降温,降湿,升压,风速加大,风向转变,对人体是一个冲击,引发或加重病症。

(二)气象对一些生理机能的影响

1. 内分泌。气温影响脑垂体(抗利尿,促甲状腺和促性腺),甲状腺,肾上腺和胰腺的功能。

2. 肝功能。寒冷促进肝细胞和肝酶(GOT,SGPT,SLDH)活性增强.

3. 代谢。儿童的代谢冬天明显减低,秋天最高。糖尿病人的代谢在夏季、初秋和晚冬时较高。冬天代谢低,高血糖、高胰岛素消耗。

4. 胃酸。冬天高酸性,夏天低酸性或酸缺乏。

5. 儿童生长发育。冬天生长慢,春天生长快。

6. 血液有形成分及化学成分。白细胞计数10~12月或4月最高,血红蛋白冬天高于夏天,血小板3~4月最高,8月最低,淋巴细胞9~2月或4月最高,血清钙8月最高,2~3月最低,血清磷2月最低,夏、秋季高,血沉冬低夏高,凝血时间在冷锋过境前缩短,冷锋过后延长。

三、气象对生物性病原体的影响

生物性病原体包括病毒，细菌，单细胞生物(原生动物)，多细胞生物(如肝蛭)和寄生虫等。它们的的生命过程受到气候(主要是温、湿度和降水状况)的影响。

(一)细菌

细菌在温度高、湿度较大和无日照的环境中容易生长和繁殖。例如，10 个副溶血性弧菌在温暖条件下经 3～4 h 的孵育可达数百万个，达到致病的剂量。湿度过大则细菌会死亡。细菌在干燥物体上低温下也可以存活很长时间。细菌产生毒素的多少与温度有关，如金黄色葡萄球菌要在 18 ℃以上才产生肠毒素，37 ℃时毒素最多。阳光中的紫外线可杀菌。虱斑疹伤寒的病原体是革兰氏阴性球杆菌，由狗虱或木虱传染。当狗的血液中的传染性立克次氏体的浓度很高，虱子才能从狗身上获得足以传染的剂量。环境温度对虱子体内虱斑疹伤寒立克次氏体的存活和虱子本身的成活都有影响。在 18 ℃时，虱子体中的立克次氏体少到检测不出来。温度在 24～30 ℃时，立克次氏体增加 2～3 倍，足以传染。

(二)病毒

相对湿度大时病毒的感染力大，但湿度小时病毒的感染力比较持久。蚊子体中的乙型脑炎病毒在 10 ℃以下环境中不能繁殖，传染力受到限制，而在 26～31 ℃时旺盛繁殖。

(三)寄生虫

1. 疟疾是由疟原虫引起的。疟原虫有 4 个品种，在蚊体中经历生长发育过程，完成孢子增殖。在蚊子体内，有两种疟原虫需要环境温度在 15 ℃以上，有一种要求 17 ℃以上，才能生长发育。有两种疟原虫进行性繁殖的适宜温度分别是 25 和 30 ℃。在 38 ℃以上就不能繁殖。气候对疟原虫及疟疾的地理分布有决定性作用。

2. 微丝蚴在蚊体内的适宜温度是 21～33 ℃。

3. 血吸虫尾蚴逸出的适宜温度是 20～25 ℃。

4. 钩蚴最适宜的温度是 25～30 ℃。

5. 蛔虫卵最适宜温度是 22～33 ℃。

6. 蛲虫卵和姜片虫卵等的生长发育都需要一定的气候环境。

四、气象对非生物性病原体的影响

这类病原体包括固态大气污染物(如颗粒物，飘尘和降尘等)、孢子、花粉和动物毛屑等。它们是敏感源，引发哮喘和干草热等呼吸系统疾病。气象的急性影响(天气影响)是空气的乱流和风对病原体有扩散和传输的作用。如杭州在开花季节花粉症鼻炎的发病率上午比下午多，晴天比阴天多。因为上午大气层比较稳定，乱流弱，花粉沉聚在近地层，引发过敏者鼻炎；下午对流较强，花粉飘散，大气底层花粉浓度小。雨天花粉不能飞扬，对人影响小。西班牙有一个港口，有些日子哮喘发病者相当于平日数 10 倍，就是因为轮船卸下散装大豆时适逢大气层稳定，尘埃不能飘散，引发哮喘。卸货时如果对流旺盛，就不会有那么多人发病。气象的慢性影响(气候影响)是气候变化使开花的时间提前或推后，改变疾病高发时间。

广义的非生物性病原体，包括气态的大气污染物。空气中大气污染物的浓度与大气稳定度密切相关。气候变化对大气污染浓度有影响。如果气候变暖，大气中的光化学反应加快，由碳氢化合物和氮氧化物在阳光作用下形成的光化学烟雾的浓度会增加。

五、气象对生物性传染媒介的影响

由传媒(如蚊、蝇、虱、蚤、卑、姜螨、钉螺和白蛉子等)传染的病在一个地方是否流行,决定于传媒的地理分布,适当的种群(数量)和传播能力。传媒能否促使疾病流行,生命周期长的传媒(如吸血蝇、苍蝇、臭虫和蚤)决定于其种群的大小,生命周期短的传媒(如蚊子、沙蝇和黑蝇)决定于对温度敏感的孵化期的状况。病原体及其传媒的生存都要求一定的环境条件。有些还要有适当的宿主。传媒和宿主生存的环境要素包括大气环境、生物环境和土壤环境等环境要素。气候环境指气候要素(如温度、湿度、降水和风等)的状况,包括平均的和极端的状况。生物环境包括植物群落和宿主种群。如伐林的同时除掉了植物群落和其中的动物,传染疟疾的几种按蚊便失去了栖息的场所而消亡。土壤环境(广义地包括陆地上的水体)对某些传媒(如钉螺)是必要的。这三个环境要素是有联系的。植物群落和某些宿主依赖于气候和土壤,而土壤又是气候的产物。所以,气候是上述三个环境要素中最根本的和最活跃(变化最快、最大)的要素。气候本身及它对其余两个环境要素的作用,基本上决定了传染病的地理范围、高发的时期和流行的规模。人能控制小气候,但很难按照主观意愿去改变大气候,以致由生物传媒传染的疾病比那些由非生物传染的病更难控制。

(一)各别气候要素的影响

1. 气温上升会加速生物传媒的新陈代谢,它便增加营养需求,嗜血传媒便更频繁地叮咬和吸血,产卵更多。温度也影响许多节肢动物传媒(蚊,蝇,虱等)的地理分布。最高、最低温度和湿度限定了它们的生存地带和活动范围。大多数节肢动物的生理功能依赖于温度。最低温度的微小改变将显著影响它的生存。例如,近几十年美国冬天较暖,霜冻较少,蚊子、蟑螂和白蚁的种群就增加。

2. 较大湿度有利于传媒的新陈代谢过程。高温高湿延长节肢动物的寿命,干燥天气下传媒更频繁觅食以补充水分。在高温低湿地区,有些昆虫可以 1 年生育两代,而低温高湿地区它们只能生育一代。

3. 降雨积水是蚊子和黑蝇等昆虫的重要环境条件。这些昆虫的生命过程有水生幼虫和蛹的阶段。降水多少和有无积水决定它们有无繁殖的场所。此外,传媒能否繁殖还要看蒸发量、土壤性质、地形坡度和有无水体。许多昆虫在洪水减退后所残存的水洼中繁殖。如果下暴雨却会把蛹冲走,甚至淹死它们。黑蝇需要在含氧的水中繁殖。湍急的溪流和山涧才有足够的氧。有些传媒,如登革热的传媒 Aedes aegypti 已适应了城市的环境,在家居的蓄水器皿中也可以繁殖而不受降水的影响。

4. 风对飞虫的吹送。风速及风向影响传媒的迁移。某些传媒,包括黑蝇、沙蝇和按蚊属(疟蚊)的不同品种,能从它们原来的地方被风吹送到数百公里之外。

(二)几种病的传媒需要的气候条件

1. 疟疾的传媒。世界上有 40 多种蚊子传染疟疾。它们生活在年平均温度 12 ℃以上的地带。温度高于 40 ℃或低于 8 ℃蚊子就不能生存。最适宜温度是 25～27 ℃。不同品种的蚊子体内的寄生病原需要温度在 14～19 ℃以上才能成长。

对疟蚊 Anopheline 的生长与环境的关系已研究得颇为透彻,建立了它的繁殖速度(虫口动态)与环境要素的定量关系的数值模式 。这模式包括以下关系:第一,温度对蚊子本身和体内的疟原虫生长发育的影响。第二,温度对未成长蚊子存活率的影响。第三,温度和饱和差(表

示湿度的一种物理量)对成长的蚊子存活率的影响。第四,降水量与积水孳生地对虫口密度和成长蚊子存活率的影响。第五,交配后雌蚊的冬眠与温度的关系。将一个地点过去 30 年平均的每周气候数据输入模式,模拟出现代气候条件下每周的蚊子数量,代表疟疾传播的现状。将未来每周的气候预测数据输入模式,即可求出未来每周蚊子的数量变化,反映疟疾传染的潜在威胁。

2. 登革热的传媒。主要是在家居容器内繁殖的 Ae. aegypti 蚊,也可由 Ae. albopictus 蚊传染。它们在冬季温度高于 10 ℃的环境中生长。严寒会冻死幼虫和成虫。温度 27 ℃时,有的品种 15 天便完成 1 个生命周期,个别品种只要 9 天就完成一代。有的品种在 30 ℃左右才传播登革热病毒 DEN-2。当温度在 32～35 ℃时,孵化期会缩短。温度降到 20 ℃以下,登革热就不会广泛传播。以曼谷的情况为例,在热季温度为 28～30 ℃时,登革热高发,而在温度为 25～28 ℃的凉季就少发。

3. 病毒性脑炎的传媒。不同种类的脑炎病毒可能由不同品种的蚊子传染。它们需要的环境不尽相同。如美国的圣路易斯(St. Louis)脑炎(SLE)一般发生在 6 月份温度在 20 ℃以上的地带。温暖年份会北进。随着温度从 10 升到 34 ℃,传播 SLE 的蚊子 Culextarsalis 的幼虫生长加快。若温度高达 30 ℃,成蚊的成活率反而减小。每升高 1 ℃,成蚊存活率逐日减少 1%。30 ℃的高温虽减小成蚊成活率,但幼虫旺盛生长和提前叮咬却增强了传染病毒的能力。温度高到 35 ℃时,叮咬吸血的蚊子反而少了。温度低于 15 ℃时脑炎病毒就不再传染。由此可知,环境温度改变 3 或 4 ℃就会改变传媒的数量和传染疾病的时间。

4. 脑脊髓膜炎的传媒。流行性脑脊髓膜炎("流脑")通常由脑膜炎双球菌经呼吸道进入血液,继而进入颅内,引起脑膜发生炎症。在美国,洛矶山脑脊髓膜炎(RMSF:Rocky Mountain Spotted Fever)的病原是革兰氏阴性球杆菌,主要传媒是美州狗虱(American Dog Tick)。扁虱的孵化需要温度在 22 ℃ 以上。虱子和它的卵适宜在高温高湿环境中生活。相对湿度 90%时存活率比湿度 75%时大得多。对狗虱生活的气象条件已研究得很透澈,建立了模拟狗虱的虫口动态和环境要素的关系的数学模式 。模式中的环境因子包括气候要素(温度、水汽饱和差),昼长,宿主和栖息地类型。模式包括以下关系:卵、蛹幼虫和雌虫生长速率与温度的关系;温度对受精的影响;栖息地类型、温度和饱和差对自由生活(不在宿主身上)的虱子成活率的影响。虱子对宿主发见率和昼长、温度和宿主密度的关系;吸血时期寄生虱的密度与存活率的关系。此模式的应用和疟蚊的模式一样,先模拟一个地点历史上虱子的生命周期及每只宿主(狗)身上每周虱子的数目与环境的关系,再用预测的环境数据(包括温、湿度)预报未来发病率的大小。

5. 病毒性肝炎的传媒。浙江临海市一带,病毒性肝炎主要由蚊子传染,其中主要是中华按蚊,三带啄库蚊和骚扰阿蚊。蚊卵在水中能耐受天气变化。蚊蛹脱壳羽化成蚊需 2～3 天,此时对天气非常敏感。气温低于 10 ℃时不叮咬。低于 17 ℃或高于 37 ℃停止繁殖。当地 5 月中旬之前,蚊子产卵、繁育和活动的活跃性视温度而定。5 月中旬至 7 月底,特别在梅雨期内,日平均温度在20～29 ℃间,水稻田正是中华按蚊和三带啄库蚊的产卵场所。如天阴有雨,光照少而湿度大,温度在20～22 ℃,两种蚊急剧增多。如降雨太大,把蚊卵或孑孓冲入河港;或天气晴燥,温度过高,蚊子都会减少。8～10 月是晚稻生育期,气温降到20～22 ℃时蚊子再度增加。若降水日数多,蚊子不能飞翔,活动范围受限制。至于骚扰阿蚊,最适宜的繁殖条件是 7 至 10 月间温度大于 17 ℃,相对湿度小于 82%时,在污水坑或池中繁殖。当地自 1950 年代起,早、晚稻

逐年增加，至1970年代趋于稳定。施肥量渐渐增加，水稻茂密遮光，稻田适于蚊子繁殖。这是这几十年来肝炎发病率逐年增加的原因。

6. 血吸虫病的传媒。钉螺生活在雨水丰沛的热带和亚热带的河流、池塘和沼泽中。

7. 几种传染病及其传媒需要的气候条件，如表6.1.1。

表6.1.1 几种传染病及其传媒需要的的气候条件

疾病	生存的气候条件	传媒	传媒需要的气候条件
利什曼病	年平均温度>10℃	沙蝇	干燥；年平均温度>10℃
嗜睡性脑炎	最热月温度>25℃	孑孓蝇	最低温度>10℃
黄热病	最冷月温度>15℃	埃及伊蚊	年平均温度>12℃
阿米巴痢疾	最热月温度>25℃		

(三)受气候影响的由生物传媒传播的主要热带病

由生物传媒传播的、受气候影响的、威胁超过4亿人口的主要热带病，如表6.1.2。

表6.1.2 受气候影响的主要热带病

疾病	传媒	受威胁人口	每年新发病人数	现在分布	受气候变化影响而改变分布
疟疾	蚊	24亿	3～5亿	热带，亚热带	+++
血吸虫病	钉螺	6亿	2亿	热带，亚热带	++
淋巴丝虫病	蚊	11亿	1.17亿	热带，亚热带	+
登革热	蚊	25亿	0.5亿	热带，亚热带	++
黄热病	蚊	4.5亿	5千	热带，南美，非洲	++

注：+++：很可能；+：有可能

六、气象对宿主的影响

生物传媒所寄生的动物称为宿主。宿主通常是狗、猫或鸟。鸟类对气候很敏感。气候对鸟类繁殖和生活的影响必影响到传媒及其传染的疾病。

第二节 疾病高发的气候背景和天气条件

一、疾病的季节性

疾病往往在一年里的某几个月高发。与气候关系密切的疾病表现出明显的季节性。下面列出与气候有关的一些疾病好发(高发)的季节或月份，尽可能注明报告资料的地方(表6.2.1和表6.2.2)。当然不意味着未报告的地方就没有这种病。

表 6.2.1 传染病高发时期

疾病	高发季节或月份 ("峰"字指高峰月份;括号内是报告的地方)
病毒性肝炎	秋、冬(北京、哈尔滨、莱芜、绍兴);春、秋(上海)
脊髓灰质炎	3~4,8~10(伊春);6~8(南方);7~9(北方)
柯萨奇病毒	比脊髓灰质炎早 1 个月;高峰在 7 月
肠道孤病毒感染	9~10
副霍乱	7~8(北纬 15°以北)
菌痢	5~10,峰 9(上海);5~6(广州);6~11,峰 8(武汉);7~9(长春,伊春);夏、秋,峰 8~9(宝鸡)
伤寒,副伤寒	5~9(华南);7~10(伊春);8~11(华北)
沙门氏菌感染	5~10
副溶血性弧菌食物中毒	5~11,峰 7~9
肉毒中毒	4~5(锡伯族、藏族聚居地区);12~2(新疆)
华支睾吸虫病	9~11(山东,辽宁)
呼吸道感染	冬半年(全国)
姜片虫病	6~9(陕西,福建);7(广东);9~11(浙江);
流感	10~11(华北);12~3(华中,江苏,杭州,邵阳,贵阳)
副流感	秋、冬
鼻病毒(感冒)	秋、冬;12~3(上海)
花粉症鼻炎	4~5,8~10(杭州)
合胞病毒感染	冬、春
呼吸道感染	冬、春
咽结膜炎	夏
呼肠孤病毒感染	夏、冬
流行性腮腺炎	1~3
麻疹	3~6(长春,伊春),10~11(伊春)
风疹	冬、春
水痘	冬、春
支原体肺炎	冬、春
猩红热及溶血性链球菌感染	3、4(华北,华东);6,8(江苏,福建);10~12(沈阳)
白喉	3~5,9~11(伊春);10~1(广东)
结核病	冬、春
流行性脑脊髓膜炎	2~4,峰 3(福州);3~4(延安);12~4,峰 2~4(济宁,黄岩);冬(武都)
森林脑炎	5~7,峰 6(伊春)
乙型脑炎	3~12(福州);6~9(北京);7~9(吉林)
流行性出血热	4~7(伊春);11~1(南方)
新疆出血热	3~6,峰 4~5

（续表）

疾病	高发季节或月份 （“峰”字指高峰月份；括号内是报告的地方）
疟疾	7～10（东莞，莱芜）
登革热	5～11（各地不同）
瘴气	3～10（广西）
斑疹伤寒	冬、春，峰初春
恙虫病	5～11（广东，福建）；6～12（海南）；7～11（云南）
回归热	3～4；4～6（辽宁）；11～5（贵州）
丝虫病	7～10，峰 8
土拉菌病	6～9，峰 8
布鲁氏菌病	羊型 4～8；牛型稍晚
炭疽病	5～10，峰 7～9
钩端螺旋体病（稻田型）	6～10（南方）
血吸虫病	春、夏、秋
稻田皮炎	6～7，插秧拔秧时
松毛虫皮炎	6～9
传染性单核细胞增多症	秋（上海）；秋、冬（湖南）
淋巴细胞性脉络丛脑膜炎	冬、春
急性感染性多发性神经炎	流行年 6～9
良性肌痛性脑脊髓炎	夏、秋
流行性喘憋性肺炎	6～9（南京）
流行性腹泻	4～6，峰 5
克山病	6～8（西南湿热丘陵）；11～2（东北，西北）
大骨节病	春
烧热病	4～5（湖北）；6～8（陕西）
低血钾软病	2～3（盐城，镇江）；4～6（湖口，巢县）；7～9（新洲）

表 6.2.2 非传染病的高发时期

疾　　病	高发月份 （报告地方）
急性心血管病（心肌梗塞等）	11～1（全国各地）
肺心病	12～2（房山）
急性脑血管病（脑卒中等）	8～1（全国各地）
慢性肾炎	11～2
溃疡病	10～3
风湿	8～10（伊春）
风湿性心脏病	11～2（西安）

(续表)

疾　　病	高发月份 (报告地方)
风湿热	3～5,10～11(新疆)
痛风	5～8
关节痛	10～11(上海)
哮喘	10～2, 5
咯血	冬、春(杭州)
肺炎球菌肺炎	12～4
高原性肺水肿	12～2
地方性甲状腺肿	12～3
特发性血小板减少性紫癜	3～5
面神经炎	12～3
精神分裂症	4～5
枯草热	4,5,9,10
子痫	11～2
急性阑尾炎	4～8(南昌)
急性胰腺炎	9～11
疖,痈,蜂窝组织炎	6～8
烟酸缺乏症	7～10
核黄素缺乏症	11～1
青光眼	11～1
疱疹性结膜炎	10～3
多形红斑	11～1
银屑病	11～2
神经性皮炎	3,4,9,10
结节红斑	3,4,9,10
带状疱疹	10～5

二、天气循环与疾病

我国秦岭、淮河以北的地区,1 年内大部分时间在高空西风带之下,常有移动性低气压(气旋)和高气压(反气旋)相间地由西向东移动。秦岭、淮河向南至南岭,冬半年也常出现这类天气。岭南以南很少受西风带移动性气旋的影响,但从北方向东南下来的高压控制一段时间,减弱并向东移去后,往往有低压或低压槽从西南方发生并移来,控制一段时间,以后又再有冷高压从北方下来……。这样,在我国大部分地区,从局部地方来看,在或长或短的时间内,有高压天气系统和低压天气系统循环相继出现,具体表现为:冷锋入侵、冷气团(高压)控制、冷气团减弱和移走、暖气团(低压)控制和加强、暖气团移走又到冷锋入侵。这样循环反复的天气序列,当然只是典型的情况,实际上有许多随机变化叠加在上面,表现为不测的风云。但从一个地方局

地的千变万化的天气中，仍然可以发现隐含着的天气循环序列。在循环的每一阶段有相应的天气，并对人体的生理和健康发生一定影响。下面着重讲述对健康的负面影响。

冷锋过境。此前，当地在暖气团的最强阶段，天气温暖潮湿，天阴或多云，气压低，吹偏南风。冷锋入侵过境时，风向突然转偏北，风速增加，气压急升，气温和湿度骤降。这种变化是在几十分钟内发生的，是急剧的天气转变。冷锋过境对人体，特别是病人的健康有不利的影响，尤以冬季为甚。病人心动过速，血压升高，反应呆滞，呼吸困难，偏头痛，神经痛。潜伏的疾病发作和病情加重的可能有：风湿痛，瘢痕痛，骨折痛，哮喘性支气管炎，肺炎，咯血，咽炎，面神经麻痹，急性青光眼，栓塞，急性心血管病（包括心肌梗塞，心绞痛，心力衰竭等），急性脑血管病（包括脑溢血，蛛网膜下腔出血等），胆结石发作，癫痫发作，胃穿孔或十二指肠穿孔，扁桃体炎，手术后并发症，阑尾炎，子痫，猩红热，湿疹。各种死亡增加。冷锋如减弱并停滞不前，变成静止锋，阴雨连续，以下疾病会发作或加重：栓塞，中风，关节炎，心绞痛，阑尾炎，白喉，猩红热，血友病关节出血，青光眼，胆结石绞痛等。

冷气团控制。在春、夏、秋季这是好时光。冬季则寒风凛冽，气压高，干燥，少云。有些疾病会发作或加重：风湿性病变，肺炎，心绞痛，流感，血友病关节出血，肾结石、绞痛，子痫，产妇提前破水。

冷气团减弱。在冬季，这是回暖的好天气。上述的有些病好转或症状缓解。

暖气团来临和控制。与冷气团的入侵不同，暖气团来临是一个缓和过程，在秋、冬季这是温和的好天气。在夏季则视气团来源于陆地或海洋而显出干热或闷热，对健康不利：低血压，甲亢，溃疡病，癫痫，脊髓质炎，子痫。如果湿度大，有心肌梗塞及支气管哮喘发作。

在我国寒冷的地方或寒冷的季节，即在西风带控制下的时期，上述天气循环及其对健康的影响较明显；不在西风带控制下的时候则不明显。

三、疾病高发或流行的气候背景或天气条件

（一）急性心血管病

包括急性心肌梗塞，冠心病猝死等。对北京，青岛，武汉，驻马店，广州等地研究的结果如下。

1. 多发月份一般为 10 月至 4 月，高峰在 11～1 月。广州和国外有报告，在过渡季节（如 4 月和 11 月）高发，国外报道在酷热天气下也会有高的发病率和死亡率。

2. 高发的天气。冷空气或寒潮（达一定标准的强冷空气）入侵，特别是入秋首次寒潮到来，冷锋过境，剧烈降温，升压，大风。如北京在高峰月份，心肌梗塞的个案有 82%发生在冷锋天气下。有些在升压前已发病。冷高压控制，持续低温和大风。天气急变，气温日际变化大，低压发展造成大幅升温和降压。武汉在一天里，高发在 18～23 时。

3. 机理：寒冷刺激交感神经兴奋，末梢血管收缩，血流阻力增加，血压升高，冠状动脉血流量减少，心脏需氧指数增高。如冠状动脉储备力较差，心肌缺氧症状加重，寒冷激发冠状动脉痉挛，在腔内有血栓形成，使原来就狭窄的管腔阻塞。寒冷刺激粥样硬化块周围，造成局部痉挛，使内皮损伤，血小板聚集和血栓形成，导致心肌梗塞。冷锋过后温度急降，体温调节中枢的反应不及，发生代谢障碍。气压剧变或气压很低时，病人对缺氧更敏感。供氧不足使代偿能力下降。过热也会使冠状动脉痉挛。

（二）风湿性心脏病，肺原性心脏病和高血压病急发

西安风湿性心脏病，多发月份为 11～2 月。高发的气候为连月气温高，降水少。

房山肺原性心脏病，多发月份为 12～2 月。高发的天气为气压剧降，1 天降 5 hPa 或 2 天降 10 hPa以上。机理：病人肺纤维化，呼吸阻力大，长期氧气不足，代偿和调节功能差，大气的氧分压下降，病人缺氧，刺激中枢增加通气量，造成酸碱平衡失调。病人的器脏原已失调，气压剧降使心肺严重失偿，病人免疫功能差，呼吸道易受感染。

田阳高血压病急发多发月份为 3～4 月，10～11 月。高发的天气为气压下降到低谷并气温上升到高峰之日，入院人数占此病入院总人数的 54%，此后 1～2 日入院人数占 34%。气压和气温变幅越大的日子，入院的人越多。机理：天气剧烈变化的刺激和交感神经活动的加强，都使肾上腺髓质分泌大量肾上腺素和甲肾上腺素，提高心脏排血量，并促使细小动脉痉挛，使血压上升。

(三)急性脑血管病

脑溢血、脑血栓形成、脑梗塞、蛛网膜下腔出血等。对北京、天津、华山、驻马店、长沙、玉山、杭州、泉州、南宁、汕头、独山等地研究结果如下。

1. 多发月份。多数地方脑血栓和脑出血在 8～1 月多发，尤以冬季为高潮。有些地方报告脑血栓形成以 12 月为高峰，5 月最少。蛛网膜出血 9 月较多，5 月较少。个别地方脑血栓和脑梗塞以夏季较多，冬季较少。也有地方如包头，各季发病率没有明显差别。

2. 高发的天气。冬季多与冷锋(特别是急行冷锋)和静止锋伴随发病，气压大幅度上升，气温急降。杭州则得出脑梗塞多在冷锋过境前 2 天，脑出血在冷锋过境后两天高发。有报告认为在冷空气进入后，气压达到高峰并且气温出现低谷时高发，如气压变化超过 20 hPa 可能导致死亡。急性脑血管病，尤其是脑出血，在春季高温低压时，夏季热低压内，以及副热带高压西侧的西南气流中都可能发生。

3. 机理。寒冷刺激交感神经兴奋，毛细血管收缩，血流阻力增加，血压升高。大气下层电位差加大，电磁场强度变化，使人的植物神经系统失去平衡。

(四)呼吸道感染等呼吸系统疾病

包括感冒、气管炎、支气管炎、哮喘、小儿肺炎、小儿急性呼吸道感染等，但不包括花粉过敏。

对伊宁、天水、西安、沈阳、张家口、北京、天津、武汉、襄樊、青岛、上海、建平、番禺、绵阳等地研究得到以下结果。

1. 多发月份。内陆为 11～1 月和 3～4 月，以 12 月为最；青岛5～7月多发，7 月为高峰。国外报道，在热带，哮喘在湿季多发。

2. 高发或病情加重的天气。急剧降温升压。天气过程有：冷锋过境；冷高压控制下气温日变化大，风速清劲。青岛在气压低，湿度大和有海雾(特别是酸雾)时也多发。

3. 机理：冷空气刺激鼻粘膜，发生细小皱摺，病毒容易侵入；鼻腔血管收缩，免疫球蛋白 A 减少；寒冷中肺泡消灭细菌能力减弱。冬季大气稳定，大气污染物沉聚在低层，浓度大，对呼吸道有损害。此外，要特别提到的，花粉是一种过敏源。过敏发生在开花的时期和花粉在贴地层飘扬的天气：无雨，微风，无强湍流。

(五)流行性感冒。贵阳、杭州、黄泛区、邵阳、伊春等地，流行月份为 12～3 月。杭州在夏季也流行过多次。流行的天气和气候，一般是在冷锋过境前后，气温降低而且有阴雨时流行。如黄泛区和邵阳在初秋日平均气温降低 10 ℃以上，连阴雨 3 天以上则流行。初次寒潮来临较早

也易流行。贵阳在接连多次冷锋和静止锋影响下，连续数十天阴雨，潮湿，低温，发生传染了4万多人的大流感。机理：低温潮湿有利于流感病毒的繁殖。锋面过境使人体感觉不适，免疫机能降低。

（六）流行性脑脊髓膜炎和流行性乙型脑炎

武都、伊春、延安、榆次、济宁、福州、黄岩等地流行性脑脊髓膜炎的流行月份为12～5月，尤以2～4月为多，如武都2～4月发病占全年的83%，仅3月1个月发病已占全年的42%。流行的气候：流行之前气候偏于温暖和干燥。如福州，1～2月气温偏高，3月气温仍明显上升，多日照，干燥，则其后将流行。如黄岩，冬季降水少，干燥，则次年春季流行。但也有相反的报告，如济宁流行的前一个冬季来得早去得迟，北风盛行。伊春前一年11月气温气压低，则次年春天流行。流行有连续趋势，前一年若大流行，次年也可能流行。机理为气候干燥使呼吸道粘膜抵抗力减弱。

流行性乙型脑炎在辽宁和科左后旗流行月份为8～9月。流行的气候为流行前气温异常高，阴雨天多。如辽宁流行前7～8月气温比常年高1～2 ℃，并有连续高温6～7 d。科左后旗流行年第3季度温度比其他年同期高4 ℃。温度在25 ℃时，蚊体中WEE病毒的繁殖很慢，减少病原体的产生。如果温度超过30 ℃，病毒的传染就终止。机理：前期高温和多雨适于蚊子和病毒的发育。如辽宁流行年三带喙库蚊的出现比常年早1个月。

（七）病毒性肝炎

绍兴、莱芜、临海、淄博、东莞等地流行月份：伊春8～9月，其余各地多为9～12月。流行前的气候：绍兴和东莞5～8月降水多，湿度大，日照少，温度低，其后流行。机理：多雨和潮湿有利于病毒繁殖。若天气太热，病毒蛋白质变性，反而失去感染力。如果雨日太多，蚊子不能到处活动，反而不会大流行。

（八）疟疾、猩红热和菌痢

疟疾在上海和东莞流行月份为6～11月，上海高峰在1950年代为10月，在1960年代为9月，在1970年代为8月。这是因为1960年代后期扩大双季稻面积，中华按蚊在6和8月出现高峰。流行前的气候，前一年气温高，冬季降水多，则当年流行。有连续趋向，上一年流行当年也有可能流行。机理：传媒是中华按蚊及其近缘雷氏按蚊（嗜人亚种）。温暖多雨适于蚊子及疟原虫繁殖。

猩红热在沈阳、伊春流行月份为10～12月。流行前的气候，沈阳夏季晴热，干燥。

菌痢在宝鸡和伊春多发季节以夏季为主，秋季次之。多发的气候背景：宝鸡是高温、潮湿、少日照。伊春是暖高压控制下，天气干热，前期降水多，潮湿，气温日较差小。机理：潮湿适于细菌生长。

第三节　死亡率与气候、天气的关系

形成一地死亡率的因素有许多，气象条件是其中之一。我们把气象影响分为气候影响和天气影响。气候影响人的生理、活动和精神状态，影响一地的疾病种类、发病时间和发病率，因而影响到死亡率。气候的影响经历一段长时期，是慢性的影响，往往和其他因素交错在一起，所以不容易定量估计气候因素对死亡率的影响。另一方面，天气影响则比较明显。严酷的天气对人体的冲击会在一天至几天内造成死亡数上升，是对死亡的急性影响。这种因素在短期内发生影

响，相对地容易和其他因素区分开来，能定量估计它对死亡率的影响。天气和气候是密切联系但又有区别的，他们之间是个性和共性的关系。天气影响（急性影响）和气候影响（慢性影响）有密切联系但又有区别。把气象对死亡的影响分成天气影响和气候影响来研究，是因为前者比较容易估计，而后者较难估计，还需继续研究。

一、死亡率的季节变化

死亡率的季节差异是由死因的结构，气候，社会发展水平，特别是医疗卫生的水平而形成的。在 19 世纪，排在死因前列的是传染病和寄生虫病。这些病的病原体和传媒在夏季最为活跃。当时的医疗卫生水平对它们不能有效控制，以致死亡率夏季最高。如日本在上世纪末叶，芝加哥在上世纪中叶，死亡最多发生在夏季，其次是冬季。到本世纪，世界各地冬季死亡逐渐在各季中占踞首位。现代死亡率高峰出现在冬季的原因，是随着世纪的进程，一方面医药科技进步，许多夏季传染病得到防治，夏季的死亡逐渐减少。另一方面，科技发达，脑力劳动者越来越多，脑力劳动繁重，体力活动减少减轻；城市人口增加，居住拥挤，环境质量下降；工业发达，三废造成环境污染；农牧业发展，食用脂肪增多。这样，循环系统疾病，呼吸系统疾病和癌症死亡就排到前面，而循环系统和呼吸系统易受寒冷刺激而发病和加重。于是，冬季死亡增加。在本世纪初，日本和芝加哥冬季死亡已增加到接近夏季。到现代，世界各地，包括我国在内，冬季死亡已超过其他季节。

如果按月统计，据 1993 年资料，北京、天津、上海、广州死亡最多发生在 12 月，占全年的 10.4%；最少在 9 月，占全年的 7.1%。如果按习惯把 6～8 月作为夏，12～2 月为冬，则上述各地冬季死亡多于夏季。为了考察死亡与自然气候季节的关系，上海把 1979～1980 年度按温度划分为 5 个自然季节。各季的起迄日期、天数和日平均死亡数如表 6.3.1 。

表 6.3.1　上海各自然季节的日平均死亡数（1979～1980 年）

季节	起讫日期	天数	日平均死亡数	与全年日平均死亡数之比
晚春	1979.5.1～1979.5.18	18	124.4	0.65
夏	1979.5.19～1979.9.23	128	158.4	0.83
秋	1979.9.24～1979.11.14	52	156.3	0.82
冬	1979.11.15～1980.3.27	134	241.3	1.27
早春	1980.3.28～1980.4.30	34	196.0	1.03

可见，冬季日死亡数比全年平均多 27%。早春仍较冷，日死亡数比全年平均略多。晚春是全年中死亡最少的季节。

死亡率随季节而变化是死亡率受气候影响的明证。对上海和广州 1981～1990 年的 10 个冬、夏季资料的详细统计分析，揭露死亡与气候的关系 。统计中将死因分成 10 大类：传染病（乙型脑炎、菌痢、伤寒和肺结核等）、癌症（包括白血病）、内分泌病（包括血液病）、精神病、循环系病（心脏，心血管，脑血管病等）、呼吸系病、消化系病（包括泌尿系病）、妇产病（包括新生儿病）、其他病（不属以上各类的），意外（包括中毒、雷击、火灾、溺毙、车祸…）。精神病和妇产病死亡的数目相对于其余各类的要小得多，统计结果不一定可靠。气候对死亡的影响反映在冬季与夏季死亡数有明显差异。各类死亡数冬季与夏季的比值如表 6.3.2。

表 6.3.2　冬季死亡数与夏季死亡数之比

地点	传染	癌症	内分泌	精神	循环	呼吸	消化	妇产	其他	意外
上海	**1.32**	0.96	**1.29**	**1.31**	**1.53**	**2.10**	**1.24**	**1.21**	**1.66**	*0.75*
广州	0.92	0.90	0.92	1.14	**1.37**	**1.39**	**1.22**	**3.15**	**1.35**	*0.69*

注：黑体数字是大于 1.2 的数值，对应寒冷期比温暖期明显多发的死因。
斜体数字是小于 0.8 的数值，对应温暖期比寒冷期明显多发的死因。

比值大于 1.2 的就是寒冷期明显比温暖期多发的病。综观两地，寒冷期多发病按比值的大小顺序是呼吸系病，“其他病”、循环系病、妇产病、消化系病……。前几节已分析了气候对几种主要疾病影响的机理，可以说明它们冬季死亡多于夏季的医学原因。这里“其他病”是多种病的总称，包括小病种和没有确诊的杂症。尽管气候对它们影响的机理难以详细分析，但是，这里的数据说明了许多“其他”疾病对寒冷是敏感的。总之，气候的慢性影响是冬季多发病和高死亡率的因素之一。癌症死亡数冬夏的比值略小于 1，即在夏季死亡略多于冬季。表 6.3.2 用斜体字表示的“意外”死亡比值远小于 1，即夏季死亡远多于冬季。原因是显然的：夏季昼长，天气不冷，人们户外活动多；夏季又多暴烈天气如台风和暴雨洪水等，意外死亡也多。从表 6.3.3 可以看出各类死亡在总死亡数中的比重。

表 6.3.3　各类死亡数占总死亡数的百分率(%)

地点	传染	癌症	内分泌	精神	循环	呼吸	消化	妇产	其他	意外
上海	1.3	25.0	1.8	0.5	29.1	12.1	6.5	0.02	18.3	4.9
广州	2.1	20.1	1.3	0.4	22.1	14.3	5.3	0.07	28.3	6.3

如果把“其他病”也算是一类病的话，各项死因在总死亡数中占的比重的顺序上海是循环系病，癌症，“其他病”，呼吸系病，消化系病；广州是“其他病”，循环系病，癌症，呼吸系病。明显受气候影响的死因，占总死亡数的百分率，上海为 74.5%，广州为 76.4%，即约占总死亡的 3/4。据北京的统计，急诊中死亡人数占急诊总人数的百分率也明显受气候影响，各季颇不相同：冬季最高，为 0.93%；夏季最低，为 0.64%。

二、与气候有关的死亡

从表 6.3.2 可以发现，上海受气候影响的疾病种类比广州多，而且死亡数的冬夏比值一般比广州大，说明受气候影响的程度较大。这是两地气候差异使然。上海冬季和夏季平均温度分别为 4.9 ℃和 26.2 ℃，相差 21.3 ℃；广州冬夏分别为 14.2 ℃和 28.2 ℃，差别仅 14.0 ℃。上海的冷热反差大于广州，对健康的影响也较大。这是按季统计的。湖北按月统计的资料表示，癌症死亡在 7～9 月最多，尤其在 8 月出现高峰。这结果和上海及广州的一致。湖北在 2～5 月另有一癌症死亡较高时期。10～1 月为较少死亡的时期，以 12 月最少。上海对 1979～1980 年度分月死亡病因统计表明，呼吸系统病，心脏病和冠心病冬季的死亡高峰和夏季的死亡低谷很明显。

对死因作更细的分类，可以对气候的影响有更深了解。美国学者按两个步骤去鉴别气候对哪些死因有影响。首先，将美国“健康和人群服务部”1980 年所制定的 1 万种死因送交流行病学专家凭经验审查，指出哪些是与气候有关的。第二，把每种死因的死亡数的年变程(1～12 月的变化)与按城市人口加权的全国平均温度的年变程和降水的年变程分别进行相关分析。相关

密切的就是与气候有关的死因。所谓按城市人口加权，就是把各城市月平均气温(或月降水量)以当地人口为权重求出全国月平均气温(或月降水量)。这种加权平均用来研究全国气候与全国经济的关系获得良好效果。经这两步认定的与气候有关的死亡原因是:活动性风湿，药剂的副作用，脑血管病，医疗的并发症，怀孕、分娩和产褥期的并发症，皮内挫伤或压伤，动脉、小动脉和毛细血管病，血液和造血机制疾病，消化系统病，肌肉、骨骼和结缔组织疾病，神经系统和感觉器官疾病，皮肤和皮下组织疾病，静脉和淋巴管疾病，异物从口、穴进入人体，内分泌、营养和新陈代谢病，头颅、脊柱、躯干和肢体骨折，高血压病，流行性感冒，神经和脊髓受伤，头颅内损伤，缺血心脏病，良性肿瘤，恶性肿瘤，外伤，非药物的物质的毒性影响 。

三、热浪与死亡

(一)热浪的冲击

夏季对人体健康最直接的天气事件是热浪，严重的可致死。美国 1980，1983 和 1988 年由热浪直接造成死亡分别为 1 700 人，556 人和 454 人。1995 年 7 月仅仅在芝加哥一地，因热浪而死亡的就有 465 人。报载南京 1998 年 7 月 14 日出现中暑高峰，各医院接诊中暑病人 50 多人。连以往数日接诊的 120 人中，有 6 人死亡，2 人垂危。事实上，因中暑而死亡的，远远不及其他病受热浪影响而死亡的人数。

安徽 1988 年 7 月 7～10 日和 15～20 日两度受到热浪冲击，合肥、安庆、马鞍山和铜陵四市最高温度连日超过 37 ℃(表6.3.4)，死亡率明显上升。

表 6.3.4　1988 年 7 月的旬气温距平(℃)

地点	上旬平均	中旬平均	上旬最高	中旬最高
合肥	+4.2	+4.2	+0.9	+1.0
安庆	+3.9	+4.8	+0.2	+1.5
马鞍山	+4.2	+3.2	−1.0	+3.3
铜陵	+3.9	+2.0	−1.1	+3.1

将 1988 年 7 月各年龄档的死亡数与 1987 和 1989 同期比较，40 岁以上的死亡数显出较大差异，年龄越大的差异越大，说明高龄人士易受热浪影响，故着重分析 50 岁以上的人的死亡数和热浪的关系。合肥市 1988 年 7 月 70～79 岁及 80～89 岁的死亡数分别相当于前一年同月的 1.7 倍和 2.1 倍，相当于后一年同月的1.5倍和 2.3 倍。上述 4 市 50 岁以上人群在热浪期间的死亡数比正常年份多 55%至 151%。热浪期间逐日死亡数和最高气温变化一致，死亡高峰一般比气温高峰滞后一天。50 岁以上逐日死亡数 y 与最高温度 x 成指数型关系：

$$y = A\exp(Bx), \qquad (6.3.1)$$

式中 A，B 是常数。此式与资料拟合的相关指数(曲线相关系数)，合肥、安庆、马鞍山和铜陵分别是 0.39，0.72，(0.52)和 0.38，信度达到 0.01 或 0.05。逐日死亡数与日平均气温的相关程度则略低。

1987、1989 年 4 市死因的前几位是恶性肿瘤、脑血管病、心脏病、呼吸系统病、外伤和中毒。1988 年死亡数高于相邻两年的病，合肥有脑血管病，心脏病，呼吸系统病和中暑。尤以心脏病和中暑最高。当地学者提出热浪的警戒指标是日平均温度 32 ℃，日最高温度 36 ℃。

(二)影响死亡的临界温度

当温度升高到某个临界温度(threshold temperature),死亡明显增加并与多种气象变量有关。临界温度是这样确定的:在逐日死亡数和最高温度的散布图上,要找出一个温度,这个温度所分割的两组资料,各拟合一条死亡数依最高温度变化的回归直线,两条回归直线的剩余平方和的合计值最小。达到这个要求的温度,是死亡数随温度变化的最佳分割点。为了考察死亡对温度变化可能的滞后,还就死亡数对温度的响应可能滞后 1～6d 的情况分别作了类似的分析。结果,上海和广州的临界温度分别是 33 ℃和 34 ℃,死亡对温度的响应无滞后。

观察北美的临界温度,发现很有意义的现象。北美由北到南几个地方的临界温度(最高温度)如下:加拿大的蒙特利尔 29 ℃,美国的芝加哥 33 ℃,圣路易斯 36 ℃,孟非斯 37 ℃,达拉斯39 ℃。可见,纬度低、比较热的地方,人们适应于炎热,相当高的温度才产生不利的影响;而纬度高、不常热的地方,稍热即对健康产生不良影响。美国东岸的纽约,临界温度是 33 ℃,和我国东岸纬度低 10 度的上海的相同。这些结果表明,临界温度颇具人类生物学的意义,并不随经济状况而有太大差异。

把温度达到临界温度以上的日子称为热日。热日死亡数超过非热日死亡数的部分称为"热有关死亡数"。有关统计如表6.3.5。

表 6.3.5　上海和广州热有关死亡数的统计

项　目	上 海	广 州
非热日平均死亡数	104.8	37.1
热日平均死亡数	134.4	41.0
每热日热有关死亡数	29.6	3.9
热日死亡数超过非热日的百分数(%)	28.2	10.5
平均每个夏季热有关死亡总数	419.0	135.0
热有关死亡数占夏季死亡数的百分数(%)	4.2	3.8
热日日数与夏季总死亡数的相关系数	0.76	0.47

因死亡(绝对)数与人口有关,最好比较死亡率。但是,统计死亡数的范围不正好吻合统计人口的范围,求出"死亡率"不准确。为了消除人口差异的影响,只能比较两地的其他相对数字。反映热浪对死亡影响大小的几个相对数字是:热日死亡数超过非热日死亡数的百分数,热有关死亡数占夏季死亡数的百分数,热日日数与夏季死亡数的相关系数等。上海这几个数都比广州大,这意味着上海人群受炎热影响比广州大。上海的临界温度是 33 ℃,广州是 34 ℃,也说明上海人群耐热比广州人差。原因是:第一,上海的大陆度比广州大,冬夏温差大。年温不算很高,但夏季最热时不逊广州,人群对炎热没有广州人那麽适应。1981～1990 年间上海最热的 1988 年,热有关死亡数达 1140 人,占夏季死亡数的 11.4%。广州最热的 1989 年,热有关死亡数为 216 人,只占夏季死亡数的6.2%。第二,上海纬度比广州高,受西风带影响的时间较广州长,温度的年际变化比广州大,在极热年份受影响很显著。患不同疾病的人对热浪冲击的耐受能力有所不同,以致临界温度也不完全相同。上海和广州的统计结果如表 6.3.6。

表 6.3.6 各种死因的临界温度(℃)和热有关死亡数

	项目	总死亡	癌症	内分泌	精神	循环	呼吸	消化	其他	意外
上	临界温度	33	31	33	35	32	34	32	33	33
	滞后日数	0	0	0	1	0	0	0	0	0
海	HRM(%)	28.2	9.9	22.7	62.0	15.3	51.5	9.5	55.2	65.8
广	临界温度	34	33	35	—	35	34	*	34	—
	滞后日数	0	0	2		0	0		0	
州	HRM(%)	10.5	8.8	48.1		14.9	13.4		22.2	

注:1. HRM(%):Heat Related Mortality,代表热日死亡数超过非热日死亡数的百分数。

2. "*"表示未检测到临界温度;传染病未检测到临界温度,未列出。

3. "—"表示个例太少,未检测临界温度。

由表可见大多数死因的临界温度与总死亡数的临界温度相差不超过 1 ℃。但是,上海的癌症死亡的临界温度比总死亡数的临界温度低 2 ℃,表示这类病人对高温很敏感。上海的精神病、"其他"病和呼吸系病人的热日死亡数比非热日多出 50%以上,是这几类病人不能耐受高温的结果。最高温度在 36 ℃以上的日子,这 3 类死亡数比非热日多一倍以上(资料表格此处未刊出),说明这几类病人对高温特别脆弱。意外死亡在高温情况下也急剧增加。广州癌症病人也不耐高温,临界温度略低。

(三)"热日天气—死亡关系"

在热日,除了最高温度以外还有一些气象变量对死亡数有影响。用双重检验的逐步回归技术,以信度 0.05 从每日 30 多个气象变量中选出与死亡有关的因子,依其重要性的顺序排列,建立"热日天气—死亡关系"如下。

上海热日死亡数

$$D_{ss} = -2367.24 + 7.50X_1 + 10.35X_2 + 5.28X_3 - 7.00X_4 + 1.93X_5, \qquad (6.3.2)$$

式中,X_1 为 02 时温度(单位℃,下同);X_2 为 14 时温度;X_3 为热日日序,即该日位于连续热日的第几天,这变量的偏相关系数是正数,说明连热越长,死亡越多,即人体对热浪无短期适应性;X_4 为 02 时南北风速(单位 m/s,下同。南风为正);X_5 为 08 时气压(单位 hPa)。此式复相关系数为 0.762。方程表明:在昼夜炎热,午夜南风微弱,早晨气压高的日子,死亡较多。热浪后期死亡比前期多,即人在热浪期间不仅没有产生适应性,而且热浪持续越长死亡越多。美国的研究结果也大多如此。希腊的雅典 1987 年在热浪第 3 天的住院人数和死亡数增加到比平日多 5 倍。因为回归系数代表自变量每变化一个单位时因变量的变化值,所以上式表明,晚上或白天温度(X_1,X_2)每升高 1 ℃,死亡增加 7 或 10 人;午夜南风(X_4)每加大 1 m/s,死亡减少 7 人;热浪每延长 1 天,死亡数在前一天的基础上再增加 5 人。

广州热日死亡数

$$D_{sg} = -74.31 - 0.12X_6 + 2.31X_7 + 1.50X_8 + 0.87X_3. \qquad (6.3.3)$$

式中 X_6 为夏季日序,即该日位于夏季的第几天。其偏回归系数是负数,表明在气象条件相同的情况下,晚夏死亡比初夏少,即在夏季内人体对炎热逐渐产生适应性。X_7为最高温度;X_8为最低温度。此式复相关系数为 0.476。它表示:在昼夜炎热的日子死亡较多,最高或最低温度每升高 1 ℃,死亡各增加约 2 人;热浪每延长 1 天,死亡在前一天的基础上再增多 1 人。但广

州人在夏季内已对炎热产生适应性。在天气情况相同的条件下，晚夏死亡比初夏少。如果热浪出现迟 10 天，热浪期间每天死亡可减少 1 人。

四、夏季“袭人天气”型与死亡

（一）“袭人(offensive)天气”

人类生活的大气环境是许多气象要素和大气化学成分的组合。各要素组合起来的“天气”对生物的综合影响，不等于各别要素影响的线性叠加，而可能是非线性的。前述“天气-死亡关系”局限于表达线性关系。最好能研究天气的综合对人体的影响，包含非线性关系。但是气象要素组合的可能性是无限的，只有把“组合”离散化，即分型或分组，才便于研究。

天气分型是天气学惯用的研究方法。美国卡克斯坦(Kalkstein)为探讨天气-死亡关系而创立的“时间天气指标”(TSI：Temporal Synoptic Index)具有以下特点：(1)用尽可能多的地面气象要素的数值作为原始数据，细致寻觅对人体有直接影响的“天气”。(2)通过主因子分析，客观地最优地精简(线性组合成)气象变量。这里用到线性组合，并不掩盖天气型和死亡数可能有非线性关系。(3)通过聚类分析客观地最优地分型。经过研究，这里的聚类分析以“平均联系法”(Average Linkage)为佳 。(4)全部工作可以编程，用批命令在电脑上操作。总之，这是一种最优化的客观的天气分型方法。主要步骤包括气象变量的主因子分析，主因子得分聚类，确定天气型和死亡数的关系等三步 。

取 6 个气象要素(气压，气温，相对湿度，南北向风速，东西向风速，总云量)每天 4 次观测值，共 24 个变量，代表一日的“天气”。应该说明，代表一天“天气”的变量数目和取法不是唯一的。许多日的“天气”构成一个原始资料矩阵。进行主因子分析，即把资料矩阵分解成为荷载矩阵和得分矩阵。取可以解释原始资料总方差的 80%以上的几个主因子(一般 5 个左右)和它的得分，即可最佳逼近原来的天气。得分相近的日子，天气是相似的。将逐日得分进行逐步聚类分析，按一定的判据中止聚类过程，客观地得到几类天气型。这样分型在一定意义上是最优的，因为主因子最佳地逼近原始资料矩阵，而且聚类原则和中止聚类也是最适当的；这样分型又是客观的，可以由计算机程序进行，无人为干预。每日天气都客观地归入某一类天气型，得到当地的天气型日历。最后，统计各型天气下的日平均死亡数及其均方差，并进一步建立此型天气下死亡数依气象要素数值而变化的回归方程。

对上海夏季天气分型发现有两型天气下死亡率相当高，属于“袭人天气”。可以从天气图找出它的天气成因。一般可以按温湿度特征或天气成因命名。

表 6.3.7 上海夏季袭人的天气型

名　称	副高控制型	海洋气团型
形成的的天气原因	副热带高压控制	热带海洋气团盛行
天气特点	为夏季最热天气。气压较高，吹微弱东南风，天空少云。	天气相当热，仅次于左列天气型。气压较低，白天吹微弱西南风，夜间很弱东南风，多云。
夏季出现频率(%)	14.2	17.9
日平均死亡数	113.9	116.9
超出总平均死亡数(%)	8.8	11.2
历史上 50 个最大日死亡数出现在本型的个数	17	30

广州在夏季最严酷的天气型下，日死亡数比夏季平均死亡数只多出 6%，就不能算是袭人天气。但广州冬季确有袭人天气——冷湿天气型，其日平均死亡数比冬季总平均死亡数多出 17% 。

（二）袭人天气型的预报和警报

把各天气型的气象条件判据和热日“天气-死亡关系”存入电脑。将天气预报输入电脑，便可判断是否将出现袭人天气型和将出现的热有关死亡数。卡克斯坦的工作组编写了专用程序，称为“炎热影响健康的监视和警报系统”(Heat/Health Watch and Warning System)。世界上迄今已有 41 个城市建立了这个系统。整体组织工作由市卫生当局主持，炎热和死亡数的预报和警报由气象部门负责，预防工作由民政，社会福利和传媒协作进行。

将未来 48 小时各有关气象要素预报值输入电脑，判断未来 48 小时的天气型。如果属袭人天气型之一，则须要进入“健康监视”(Health Watch)，仅向主持单位通报。将未来 24 h(时)气象要素预报值输入电脑，如果属袭人天气型，则进入“健康警戒”(Health Alert)，同时将预报的有关气象要素值代入热日天气-死亡关系，预测热有关死亡数，通知主持单位。如预测有较高死亡数发生，则由主持单位通知媒体，在早晨，最迟在午前发出“健康警报”(Health Warning)。预防单位在接到警戒或警报后，根据情况采取措施：在报纸、电台和电视台发布炎热天气信息和防暑降温的建议，开通热线电话回答市民咨询。启动“老伙计系统”(Buddy System)，义工访问贫苦家庭，提供帮助。和老人组织合作，为有需要的老人提供帮助。公用事业单位保证水电供应，并为穷人开放避暑场所。医疗单位作好救护准备。

（三）热浪引起的“超前死亡”

热浪期间死亡率明显高于平均值。细致的观察发现，热浪过去后的一个短时期内，死亡率并不是回复到平均值，而是低于平均值。下面采用医学界通用的死亡率计量单位，即以每 10 万人口中死亡人数表示死亡率。纽约 1966 年 7 月初开始的长达 10 余天的热浪过程，死亡率比平均值累计多了 $19.8/10^5$。其后 20 多天出现颇低的死亡率：低于平均值累计达 $8.6/10^5$。这意味着，原来(假定没有热浪出现的话)在热浪后那一段时间才死去的人，受不住热浪的冲击，“超前”死去了。“超前”的死亡数占“热有关死亡数”的百分比可以这样估计：$8.6/19.8=43\%$。“超前死亡”的原文是“死亡位移”(mortality displacement)。这部分死亡确实是在热浪冲击下死去的。但是，如果全部算入“热有关死亡数”中，而不注意到热浪后死亡数异常的小，所计算的“热有关死亡数”就偏大了。认识到“超前死亡”的存在，那麼热浪造成的超常的死亡数，应该是原来计算的“热有关死亡数”减去“超前死亡数”，才较为合理。要定量计算超前死亡数是很难的，初步做法如下：

先要确定每次热浪的起止日期。对美国许多城市几经试验得知，要以“袭人天气型”来定义热浪：热浪的第一天必须是某型袭人天气，热浪过程至少包含 3 天袭人天气，如果袭人天气中断，间断不能超过 4～6 天(视前期袭人天气多少天而定)。这样的定义是经多次试验才确定的，可以选到合乎条件的、足够大的热浪样本。除天气型应每日确定外，其他变量(包括死亡数和有关气象要素值)的时间序列，都要用 5 天滑动平均值，以得到平滑的序列。热浪中某日(i)的实测死亡数 M_i 由以下各项组成：

$$M_i = B + H_i + L_i + D_i, \qquad (6.3.4)$$

式中，B 是夏季日平均死亡数，由历史资料求得。H_i 是当日热有关死亡数，按前述方法求得。未知数有 L_i 和 D_i。L_i 是前 1 天高温引起的、滞后到当天才发生的热有关死亡数。以前的研究得

知这种滞后不超过 1 天，且 L_i 与前 1 天热有关死亡数 H_{i-1}成正比，比例系数是 a，即

$$L_i = aH_{i-1}. \tag{6.3.5}$$

因为热浪第 1 天 $L_1=0$，第 2 天才有 L_2。历史上任何一次热浪，假定 D_i已知，由第 1 天的 H_1 和第 2 天的 L_2 可以求出一个 a。D_i 就是要求的“超前死亡数”，是另一个未知数。在对历史上某一个热浪求解未知数时，对 D_i 先设一个初值和它对应的 a 的初值，然后循环迭代，直至 D_i 稳定下来，就得到所要求的 a。最后，取所有各次热浪的 a 的平均值作为普遍适用于各次热浪的 a。

超前死亡的数量与热浪的强度和热浪前后的天气有关。经计算，美国 14 个城市超前死亡数占热有关死亡数的 22%～29%，平均为 26%。最小为波士顿的 13%，最大为圣路易斯的 47%。

（四）空调减少热有关死亡的作用

空调显然有助于人们渡过热浪的袭击，减少热有关死亡。香港在热浪侵袭时开放有空调的公共场所给穷人住宿，意义在此。若一个地方保有逐年使用空调的数据，就有可能估计空调在减少热有关死亡中的作用。美国的圣路易斯，家庭空调的拥有率从 1965 年的 40%到 1992 年的 91%。在此期间的夏季死亡率有所降低。当然，死亡率降低的原因是多方面的，要定量估计空调的作用是困难的，现在的做法如下：

随着年代的推移，夏季死亡率的变化是由于以下因素：人口结构的改变；医疗条件的改善和生活质量的提高；空调及其他防暑降温设施的增加。要估计空调的作用，先要对死亡资料进行人口数量和年龄结构的订正，求得可以逐年比较的死亡数。还要估计医疗条件改善所减少的死亡数，才有可能估计空调的作用。为达此目的，将历年逐日死亡数分成两组，一组是非袭人天气的日子的死亡数，是没有使用空调的情况下的死亡数。这部分死亡数随年代变化的回归系数可以表示由于医疗条件进步和生活质量改善的作用。另一组是袭人天气日子的死亡数。这是在使用空调的情况下的死亡数。这部分死亡数随年代变化的回归系数，表示医疗条件和生活质量的改善的作用，也包括空调的作用。上述两个回归系数的差，粗略地反映随着空调增加使热有关死亡数的减小。

美国那些夏季不常有热浪的城市，现在家庭的空调拥有率在 40%～70%间。随着气候变暖，估计到 2020 年空调使用达到饱和，可以减少热有关死亡数。美国有 22 个城市“非袭人天气”日子死亡数在 1964～1988 年间下降了，显示医疗和生活的改进。其中有两个城市“袭人天气”日子死亡数减少不明显，未见空调作用；另外 20 个城市在此期间“袭人天气”日子死亡数减少的幅度，比“非袭人天气”日子的幅度更大，显现出空调的作用。现在空调使用率不高的城市，今后空调若趋于饱和，热有关死亡数甚至于可以减少 38.4%。

五、人体对炎热的适应

人们有这样的认识：生活在不同气候条件下的人群，对炎热的适应能力是不同的。首先，上海热日死亡数与气象变量的关系较强，而广州较弱；上海热有关死亡数占夏季死亡数的百分比较大，而广州较小；上海有袭人天气型，而广州没有；上海对炎热没有季节内的适应性，而广州有。以上表明上海人群对炎热的适应性较广州人群差。分析其原因，是终年温热的地方的人群对炎热有较好的适应性。其次，死亡率对炎热所敏感的临界温度，美国低纬度终年温热的地方，比中、高纬度地方的临界温度要高，即生活在温热气候下的人群对炎热有较好适应性。这个

推论和前面的一致。如能设法估计不同地点这种适应性所能减少的死亡数，对全球变暖后天气对死亡的影响的测算就比较准确。定量估计人体对炎热的适应的原理如下：

现在不热地方将来变暖后人群对炎热的反应，应该相似于现在温热地方人群对炎热的反应。现在温热地方的热日“天气与死亡关系”，应该能用于估计现在不热地方将来人群完全适应变暖后的热有关死亡数。计算“完全适应”情况下的热有关死亡数的方法，是对现在不热的甲城市，找出一个对应的“相似城市”乙城市。乙城市现在的气候相似于甲城市将来变暖后的气候。乙城市现在的“热日天气与死亡关系”就用来估计甲城市人群“完全适应”了变暖后的热有关死亡数。不过，“完全适应”只是极端理想的情形。因为，现在不热的甲城市的人工环境如城市布局，建筑形式，防暑设施以及人们的生活习惯和传统，届时不可能改变得完全和相似的乙城市那样，而人工环境不作重大改变和人们生活习惯不改变，人体对炎热是无法完全适应的。所以，现在不热地方的人群，在全球变暖后，对炎热不会完全不适应，也不容易完全适应，最可能是“部分适应”。基于这个认识，对全球变暖后热有关死亡数的测算，以人群能够“部分适应”为前提。

六、冬季天气与死亡

(一)低温与死亡

在严寒日子死亡增加，这是各地普遍的现象。冬季死亡最敏感的气象变量是最低温度。死亡数随最低温度的降低而少量增加，并且死亡对低温有滞后。滞后的日数有变化：上海以滞后1天为多；广州以滞后 3 d 为多，最长的可滞后 6 d。死亡数目随着降温而增多远远没有死亡随着炎热而增加那么剧烈。冬季一般检测不到像夏天那样的死亡数随着温度变化而急剧变化的临界温度。回顾关于夏季的讨论，死亡对高温的响应往往在同 1 天，少量的滞后 1d。这可能是人们防寒的手段比防暑更为有效，缓解了严寒的冲击。

将冬季所有日子作为样本，通过逐步回归技术，以信度 0.05 从 30 个气象变量中选出逐日死亡数依气象变化的复回归方程“冬季天气与死亡关系”。式中自变量按重要性顺序排列。上海逐日死亡数与前一天气象变量的关系是：

$$D_{ws} = 152.85 - 1.93X_9 + 0.15X_{10} - 0.50X_{11}. \qquad (6.3.6)$$

式中，X_9 是 02 时温度(单位℃，下同)；X_{10}是冬季日序，用来反映季节内人体的适应性，原理和夏季日序相同；X_{11}是总云量。此式复相关系数是 0.376。它表明：夜间低温，白天少云，次日死亡较多。在同样天气条件下，冬季后期死亡比前期多，即人体对寒冷没有产生季节内的适应性。

广州冬季逐日死亡数与前第 3 天的气象变量的关系是：

$$D_{wg} = -272.44 - 0.64X_{12} + 0.07X_{10} - 0.53X_9 + 0.33X_{13} + 0.90X_{14} - 0.60X_{15}. \qquad (6.3.7)$$

式中，X_{12}是 20 时温度；X_{13}是 20 时气压，X_{14}是 02 时东西向风速(西风为正)；X_{15}是 08 时南北向风速(南风为正)。此式复相关系数为 0.466。它反映：夜间低温，高压，西北风大，3 天后死亡增加。在同样天气条件下，晚冬死亡比初冬多，即没有季节内的适应性。

不同死因死亡数与天气的关系的统计表明，只有内分泌，血液病和意外死亡很少受低温影响，其余各类死亡随着降温而有所增加，以“其他病”，呼吸系统病和传染病死亡增加略快。

(二)冬季天气型与死亡

将广州冬季气压、气温和相对湿度每天 4 次观测值，经向风速和纬向风速每天 2 次观测

值，和日平均总云量共 17 个变量作 TSI 分析，得到天气型日历。由于广州冬季死亡对于天气变化的响应可能滞后达到 6 天，所以统计某型天气影响下连续 6 天内平均每日死亡数如表 6.3.8，代表该型天气影响下的死亡数。

表 6.3.8 广州冬季天气型及 6 日内日平均死亡数

天气型	冷湿型	干燥型	冷干型	暖湿型	暖干型	强冷锋	新鲜冷空气
频率(%)	21	6	56	15	2	(仅 1 次个例)	(仅 1 次个例)
日平均死亡数	48.2	42.9	39.4	38.1	33.1	49.3	43.5
死亡数距平(%)	17	4	−4	−8	−20	20	6

"干燥型"(小股冷空气入侵)和"干冷型"(变性冷高压稳定控制)天气下死亡数距平百分率的绝对值不超过 5%，对健康无影响。较高死亡数发生在"冷湿型"天气，是较强冷空气入侵的过程和冷空气入侵初期，当地位于弱冷锋北侧。只出现 1 次个例的强冷锋影响下也出现了相当高的死亡数。这两型天气一致地表明冷空气对死亡有急性影响。暖干型和暖湿型天气则出现低死亡数。

第四节 气候变化对人体健康的影响

一、气候振动对人体健康的影响

传染病的生物性传媒的活动受到气候变量如温度，降水和湿度的波动的影响。许多传染病于本世纪之初在许多地区，特别是在发达国家消失了。目前，一些"老的"传染病又在很多地方"复活"起来，食物中毒也在增加。这固然是由许多因素造成的。社会因素如人口急剧增长，工业发达，城市化，贫富分化，贸易和交流频繁，大量伐林，不适当地使用杀虫剂和抗生素，社会政治动荡等。此外，也和气候振动有关。研究了湖北住院肿瘤病人死亡率与气候的关系。随着经济建设的进展，医院病床增多，住院人数和死亡数相应增加。为了使逐年死亡数资料具有比较性，将每年死亡数除以有效病床数(后者是床位数乘以利用率)，得到标准化的"死亡率"，作为研究的对象。1976～1993 年间，死亡率 y 随年份 t 的推移而呈负指数减少。死亡率的计算值

$$y_0 = 0.708\exp(-0.886t). \qquad (6.4.1)$$

此式的相关指数为 0.92，信度达 0.01。死亡率随时间推移而下降，反映了治疗肿瘤的医疗条件的进展。逐年实际死亡率 y 对死亡率计算值 y_0 的偏差 d 反映医疗条件以外的社会和自然因素引起死亡率的波动。

死亡率偏差 d 与气候有关。在年平均气温正距平超过 0.3 ℃的 4 年中，正偏差占 3 年。在年温距平小于 −0.3 ℃的 4 年中，负偏差占 3 年。可见，癌症死亡大体上伴随气候变暖而增加，伴随气候变冷而减少。这结论与前面指出的夏季癌症死亡略多于冬季是一致的。如将死亡率与年降水量距平对照，发现虽然有正变关系，但不如与温度关系密切。还统计过死亡率偏差与太阳黑子和南方涛动的关系。得出在太阳黑子高值年前后和南方涛动指数小于 −0.4的年份死亡较多。

二、全球变暖对人体健康的可能影响

(一)概述

按照政府间气候变化委员会1996年的预测,大气中CO_2加倍时全球气温平均上升1.0至3.5℃。陆地升温比海洋多;高纬升温比低纬猛;冬季升温比夏季强。全球每升高1℃,平均雨量约增加2%。至于各地未来的气候变化情景,虽然很难预测,也用各种大气环流模式(GCM: General Circulation Model)对温度和雨量以至个别其他气象要素的平均值作出了粗略的的估计。

全球变暖对健康的影响可粗略地分为直接影响和间接影响:

直接影响。直接的影响是由温度升高和其他极端天气事件(风暴,洪涝等)的强度和频率的改变发生的影响。极端天气引起受伤,死亡,生理紊乱,还破坏卫生设施。对这类影响没有能作出定量估计。至于温度升高对健康的影响,应包括慢性影响和急性影响。慢性影响是:寒冷期变暖使原来由于严寒所助长的发病率和相应的平均死亡数减少;温暖期变热使原来由于炎热所助长的发病率和相应的平均死亡数将增加。急性影响是:夏季酷热日子和炎热程度的增加,使短时死亡数增加;冬季严寒日子的减少和寒冷程度的减低,使短时死亡数减少。迄今,对慢性影响只有定性的研究,包括本节下面所介绍我国的研究。对急性影响的研究,即对热浪影响的研究,在美国和我国开展了10多年,经历了曲折,取得了基本的结论。

间接影响。主要是气候变化干扰生态系统,包括:(1)影响疾病病原体和传媒的生存范围和活动规律,改变它们所引发的疾病的高发时期、发病率和所到达的地理范围。用模拟传媒与环境关系的模式,预测某些疾病的发病率会上升。例如,集成全球模式估计,世界上受疟疾威胁的人口占全球人口的百分比,将从现在的45%增加到2100年的60%,主要在热带亚热带现在虐疾频发地带的边沿,和温带缺乏良好防治疾病体制的地方。(2)改变水中和食物所携带的(即非生物传媒传染的)病原体的生态环境,使消化系统疾病和某些其他疾病(如霍乱)的发病率增加。这主要出现在热带亚热带。(3)由于大气中CO_2增加而造成的气候变暖,对农作物的光合作用和病虫害等发生影响,因而影响人类的营养水平,间接影响人的体质。CO_2增加这一事实本身使植物的光合作用加强,有利于农作物增产。无霜期延长使高纬度和经常受寒害的地方的农业得益。但低纬度将受到负面影响:高温增加蒸发,干旱更加严重和频繁。不仅农作物受害,有些地方甚至饮水都发生困难。农业减产使食物短缺,人群营养和儿童发育不良,健康必然受损。(4)变暖会影响大气污染而影响人体健康。高温会加速大气化学过程,使光化学烟雾浓度增加;气候变暖使花粉孢子增多,增加过敏疾病如干草热和哮喘的发病率。另一方面,高温加强大气对流,低层的污染物可扩散到高空使地面浓度降低。(5)海平面上升,潮水更高,风暴潮更强,淹没沿海低地,某些地区人口被逼迁移。

气候变化不仅仅是气象要素的平均值变化,还有极端状况(如最高温度,一日最大降水量等),频率(如酷热日数,暴雨日数等),变率(如洪涝和干旱的程度和概率等)和天气事件(如厄尔尼诺,拉尼娜,台风和龙卷风)等的变化。气候变化的各个方面对健康影响的程度估计如表6.4.1。

表 6.4.1 气候变化的各个方面对健康影响的程度

对健康的影响	气象要素的平均值的变化	极端天气事件	气候变率的改变	气象昼夜差异
热有关疾病和死亡		+++		+
灾害造成身体和心理伤害		++++		
传媒传染疾病	+++	++	+	++
非传媒传染疾病	+	+		
粮食供应,饥饿	++	+	++	
海平面上升后果	++	++	+	
对呼吸系统影响:				
大气污染	+	++		+
花粉,湿度	++			
人口迁移	++	+	+	

注:++++表示影响很大,+表示影响小,空格表示不明。

全球变暖的变化是多方面的,对健康的影响是广泛而复杂的,很难作出全面和准确的预测。幸好 GCM 预测得比较好的平均气温是对健康影响最大的气象变量,使科学工作者有可能就全球变暖对健康的主要影响作一些估计。当然,这个方面的研究尚不成熟。

(二)CO_2 倍增时我国发病率的可能变化

1. 我国寒冷期和温暖期的高发疾病。(1)寒冷期多发的疾病。上海和广州冬季死亡数明显比夏季多的有呼吸系统病,循环系统病,消化系统病和"其他病"。这四类死亡占总死亡数的 49.4%(上海)和 70.0%(广州)。其他地方在寒冷期多发的有循环系统病(包括急性心血管病,肺原性心脏病,急性脑血管病,风湿性心脏病合并心力衰竭和高血压病急发等),呼吸系统病(包括感冒,呼吸道感染,气管炎,支气管炎和哮喘等)和某些传染病(包括流感,流行性脑脊髓膜炎和猩红热等)。(2)温暖期多发的疾病。上海,广州和湖北夏季死亡明显超过冬季的有癌症和意外伤亡。其他地方温暖期多发的疾病有某些传染病(包括流行性乙型脑炎、疟疾、菌痢、病毒性肝炎、瘴气和麻疹等),精神分裂症,阑尾炎急发等。

2. CO_2 倍增时我国的气候情景。有一类预测的情景我们称之为"轻微变暖",是我国某些专家所研究或推荐的一类:夏季我国东半部从南到北升温不超过 0.7~1.0 ℃;冬季变暖从南到北不超过 1.1~1.4 ℃。按这个估计,气候学夏季(候温高于 22 ℃)将延长 15~20 d;气候学冬季(候温低于 10 ℃)在北方和中部将缩短 10 d;南方有些地方现在就没有气候学的冬季,气象界惯用的冬季(12~2 月)未来更温暖。另一类预测的情景我们称之为"剧烈变暖",由 GISS(美国哥达德空间科学研究所),GFDL(美国地球流体动力学研究所)和 UKMO(英国气象局)的大气环流模式作出,预测我国东半部冬夏季各月气温比现在升高3~5 ℃。这样,我国东半部气候学夏季将延长 40 d 以上;气候学冬季在北方和中部将缩短 20~30 d;南方冬季将很温暖。

3. CO_2 倍增时我国发病率的可能变化,上述两类情景在数值上差距颇大,但变暖的方向是一致的。据此对我国发病率只能作定性的估计:一方面,变暖后冬寒程度减弱,寒冷期多发病如呼吸系统病、循环系统病、消化系统病、小病种和杂症("其他病")的发病率将下降;原在寒冷期流行的传染病如流行性脑脊髓膜炎,流感等将减少。另一方面,夏季高发的病和相应的死亡数将增加:癌症发病率将增加;意外伤亡将增多;温暖期由传媒传染和不净水引起的各种病如乙脑,虐疾,登革热,痢疾,伤寒,霍乱等发病率将增加,传染范围向北扩展。

(三)CO_2 倍增时天气对死亡的可能影响

若要估计全年的死亡率的变化，须对四季分别估计气候变暖的影响。前已说过，气候变暖包括平均值的变化和极端天气事件的变化，应分别作出估计。前者对发病率及相应平均死亡数的影响是慢性影响。后者对人体的冲击直至死亡是急性影响。本来，气候通过天气表现出来，气候寓于天气之中。要把气候和天气影响截然分开是十分困难的。不过，限于现在的研究水平，把难于解决的气候影响留作未知数，先研究天气影响，在分析的基础上再综合，是研究工作的策略。

对未来气候变暖带来的更频繁的酷热天气，人群可能有“完全不适应”，“部分适应”和“完全适应”3 种情况。美国对 15 个城市估计，如果人群对变暖“完全不适应”，热有关死亡数要比现在多 7 倍，如果人群对变暖“部分适应”，热有关死亡数会比“完全不适应”情况减少约一半。若扣除“超前死亡”热有关死亡数要扣减大约 26%。空调饱和后，热有关死亡数可以减少，极端的城市可以减少 38%。

1. CO_2 倍增时上海和广州死亡数的变化

CO_2 倍增时的气候情景如属“轻微变暖”，人们不存在“不适应”问题。夏季上海和广州都上升 0.6 ℃；冬季两地分别上升 0.7 和 0.9 ℃。将气候情景输入现代“天气-死亡关系”，即可输出未来的死亡数。

未来气候如属“剧烈变暖”，取 GFDL 预测的情景：夏季上海和广州分别升温 3.9 和 3.5 ℃，冬季分别上升 4.6 和 3.4 ℃。其他气象变量对死亡率影响较小，而且 GCM 往往不能预测，仍取现代数值。剧烈变暖情景下人们就有适应与否的问题，估算结果有很大差别。第一种前提下(人们对变暖“完全不适应”)，应将当地未来气候情景输入当地现代“天气-死亡关系”中。第二种前提下(“完全适应”)，应将当地未来气候情景输入相似城市现代“天气-死亡关系”中，输出的是未来“完全适应”情况下的死亡数。但因资料所限，无法探讨“相似城市”，没能求出“完全适应”情况下的死亡数。第三种前提下(“部分适应”)，可以取“完全适应”和“完全不适应”两种情况下预测死亡数的平均数。但是我国没有“完全适应”的研究结果，只能参考美国的。美国“部分适应”情况下的死亡数相当于“完全不适应”情况的死亡数的 65%。将我国预测“完全不适应”情况下的死亡数乘上这个百分数，权当“部分适应”情况的死亡数。对剧烈变暖的情景，只估计“部分适应”为前提的死亡数如表 6.4.2。尚未考虑“超前死亡”和空调饱和的影响。

表 6.4.2 CO_2 倍增时死亡的变化的百分数(%)

地点	上海				广州			
变暖程度	轻微		剧烈		轻微		剧烈	
适应情况	完全适应		部分适应		完全适应		部分适应	
季节	夏	冬	夏	冬	夏	冬	夏	冬
总死亡	0.8	−0.5	16.2	−3.6	1.3	−1.7	15.9	−8.4
传染	0.6	−1.2	4.6	−9.0	2.7	0.0	4.8	0.0
癌症	0.5	−0.4	4.1	−3.1	0.6	0.0	4.2	0.0
循环	1.4	−1.1	18.3	−7.9	4.2	−2.4	28.8	−11.4
呼吸	−0.2	0.0	15.9	0.0	2.3	−2.5	17.5	−12.1
消化	0.8	0.0	7.1	0.0	2.8	−1.8	17.0	−8.8
其他	1.6	−3.8	36.4	−28.3	5.6	−2.8	30.8	−13.6
意外	−0.2	0.9	12.2	6.8	3.1	0.0	26.5	0.0

如果轻微变暖，上海冬、夏季大多数原因的死亡的改变约在 1%上下，而且符号相反。虽然冬夏死亡基数(总数)不同，冬夏死亡变化的绝对数将大体抵消，净变化很小。变化稍大的是“其

他病”,冬季的减少超过夏季的增加,总的来说将减少。广州死亡变化百分数比上海略大。夏季多类死亡增加的百分数超过冬季的减少,但因为冬天的基数大于夏天,冬季和夏季死亡的绝对数的变化大体上抵消,净变化不大;意外死亡和传染病死亡有净增加。

如果剧烈变暖,升温达到 4 ℃左右,上海夏季最高温度超过 34 ℃的热日增加到 54 天,相当于现代的 4.5 倍。广州增加到 79 天,相当于现代的 3.3 倍。袭人天气大增,热有关死亡数必然剧增。冬季严寒天气减少,气候宜人,死亡有所降低。但多数死因的死亡数的变化幅度冬不抵夏。如果只是对比冬夏(不考虑春秋),死亡明显增加。但要说明的是,这是在“部分适应”的前提下天气的急性影响;同时,所推算的热有关死亡数未扣除“超前死亡”部分和空调饱和的影响。

在本节开头就说过,估计全年死亡率的变化,先要对四季分别计算,并且要就气候的慢性影响和天气的急性影响分别计算,然后汇总。根据现有的研究只能作以下定性的估计:全球变暖后,气候影响使寒冷期死亡的减少数超过温暖期死亡的增加数;天气影响是夏季酷热使死亡增加;冬季严寒天气减少使死亡减少;但酷热使死亡的增加数远远超过寒冷的缓和使死亡的减少数。气候影响使死亡净减少,天气影响使死亡净增加,两者方向相反,可以相互抵消一部分。

2. CO_2 倍增时其他国家的热有关死亡数

在前面通过北美几个城市的资料说明了临界温度和气候的关系。加拿大多数地方夏季没有威胁人体健康的酷热。但是,热带气团有时入侵加拿大南部却使人们对偶尔出现的炎热难以适应,在不很高的温度时就出现了较高的死亡率。加拿大 10 个城市中只有 2 个检测出临界温度。按照前面讲的方法,计算了美国、加拿大和埃及几个地方的热有关死亡数如表 6.4.3 。应该注意,这未减去“超前死亡”的数字。再者,这不是死亡率,而是死亡(绝对)数,与人口有关。

加拿大死亡受夏季天气急性影响不如美国大,所列出的两个城市可能是北美天气对死亡数发生急性影响的北界。

表 6.4.3 世界上几个地方的热有关死亡数

城市	临界温度(℃)	现在每年热有关死亡数	GFDL1989 年预测的气候情景			
			2020		2050	
			不适应	适应	不适应	适应
美国						
Atlanta	34	78	191	96	293	147
Dallas	39	19	35	28	782	618
Detroit	32	118	264	131	419	209
Los Angeles	27	84	205	102	350	174
New York	33	320	356	190	879	494
Philadelphia	33	145	190	142	474	354
San Francisco	29	27	49	40	104	85
加拿大						
Montreal	29	69	121	61	245	124
Toronto	33	19	36	0	86	1
埃及						
Cairo	—	281	476	—	830	—

第七章　水文、水资源与气候

第一节　水文、水资源和气候的关系

一、水分循环

水是人类及其他生物生存所不可缺少的资源。世界上四大文明古国都在河流两岸发育起灿烂的文化。人类的历史证明了，水是文明进步的重要物质条件。即使在现代科学技术条件下，缺水地区经济的发展仍然受到很大限制。

为了防洪、排涝、抗旱、灌溉、发电、航运、发展渔业和养殖业，供应生活和工业用水，总而言之为了防治水患，兴修水利和有效地利用水资源，需要掌握水的规律。

地球上的水体，包括海洋、湖泊、河流、沼泽、冰川、积雪、水库、地下水等，有其形成、运动和变化的规律。水体的各种现象及其规律，称为水文。人们从水体得到逐年可以更新的淡水(不包括海洋的咸水)就是水资源。水资源包括地表水(河流、湖泊、冰川的水)、土壤水(渗透到土壤中并为土壤所保持的水)和地下水(在地下流动的水)。

大气中的水汽被抬升而冷却，凝结成云。云滴增大，可成为降水，落到地球表面。地表的水分蒸发成水汽，又回到大气中，完成了一次“水分循环”。水分循环各环节的概量是这样：全球全年降水量有 488×10^3 km^3。它的 78%落到海洋上，其余 22%落到陆地上。14%由陆地蒸发到空中，8%流入海洋，称为径流。落到海上的降水同流入海洋的径流共计 86%，蒸发回大气中。水分循环过程在大气、水体和陆地上进行，是大气科学和水文学共同研究的对象。水文气象学研究大气科学和水文科学的边缘问题，为水利的综合规划和水利设施的设计和运行提供科学依据。水文气象学是应用气象学的一个分支。

二、水量平衡和水资源

大自然赋予一个地区的淡水是有限的。海水虽多，但含盐分，不适合工农业和生活使用。淡水才能作为水资源。陆地上的淡水有 75%以冰川，冰层和高山积雪形式存在。另有 14%深藏在地面 850 m 以下的土壤中，不便应用。水资源主要指能够方便利用的从地面至 850 m 深的(包括河流、湖泊)可以逐年由降水更新的淡水。这部分仅占地球上淡水的 11%。

评价水资源最好是以闭合流域为单位，即流域外没有水从地面或地下流入，流域内的水的唯一来源是降水。雨水最终汇入河道而流出。在河流一个适当的断面可准确地测得全流域的径流量。流域在一个时段内的降水总量

$$r = E + f + \Delta S \quad (7.1.1)$$

式中，E 是蒸发量；f 是径流量；ΔS 是土壤水分的改变量。这就是流域的水量平衡方程式。既然水资源是常年的量，土壤水分便没有大量的增减，ΔS 近似等于 0，水量平衡方程式变得十分简

单。这时,水资源是降水量扣除蒸发损失后剩余的水量。对于不闭合流域或其他任意一个地区,还应当考虑它与域外通过地面和地下进行的水分交换。一个区域的降水(包括由它形成的积雪,冰川等)和从地面或地下流入的水,减去蒸发的损失和由地面和地下流出的水,余下的就是可用的水。这部分水量的常年数值,便是可用的水资源。我国水资源总量为 28 124 $\times 10^8 m^3$,人均拥有量只是当今世界人均量的 1/4,或相当于美国和日本人均量的 1/5,加拿大的 1/50,所以说水资源不丰足,但超过国际公认的贫水线(500 m^3/人),还不算匮乏。主要问题是水资源地域分布不均匀和时间分配不均匀。南方除气候异常年份外尚够用;北方如黄河,淮河和辽河流域人均量不到1 000 m^3,尤其是海河流域只有 365 m^3,常有干旱。年内分布不均匀而且年际变化大,也是重要的缺陷。雨季的暴雨不能全部利用,旱季水量不足;涝年雨水过多,旱年水分不足。气候变迁使有些地方变旱,原有的水资源渐渐减少。以上讲的是我国水资源问题的气候原因。此外,社会原因也给水资源造成问题。废水污染河水及沿岸水域,减少了可用的水资源,甚至于个别地方无净水可用。用水无全面计划,上游浪费下游无水。评价水资源是要算清水资源的数量,地域分布及时间分配,以便合理地加以利用。评价水资源需要对流域的降水和蒸发进行估算。

不论流域是否闭合,评价水资源要搞清降水量和蒸发量年平均值,年内变化,年际变化和地域分布。具体地讲,是以下几个气候问题。

降水量的地域分布很不均匀,它随时间的变化也很大。尽管气象和水文站都观测降水量,年代也不短,但是,常规降水资料仍不能满足水资源评价的需要。

水资源主要由降水量和蒸发量决定。蒸发量主要依赖于温度,而温度的年际变化比降水量的年际变化小,所以,水资源的变化主要受降水量的年际变化的影响。水资源的稳定性简单地用降水量的保证率表示。如某一降水值(量)在长时期中平均 100 年有 95 年能达到或超过这个值,其保证率便是 95%。有 95%的年份能保证达到或超过的值是较小的量。而只有 5%的年份才能达到或超过的值是较大的量。水资源评价中要计算保证率为 95%,75%,50%,20%和 5%的年降水量。由这些数据可以预先估计未来水资源的变化,规划水量的调配和使用。.

年降水量的保证率还不能完全表示水资源的可用性。水资源的可用性还受降水强度和季节性旱涝的影响,如无水利工程调节,大雨和暴雨形成急促的径流,不能充分利用,反而造成灾害。缓和的降水才易于有效地利用。干旱季节水分不足,过分多雨的季节雨水不能充分利用。

降水的长期变迁造成水资源的缓慢变化,甚至会影响到当地社会的发展。在六七千年前的新石器时代,新疆的罗布泊附近是人群的聚居场所。那里有一个城市叫楼兰,是两汉客商通往西域必经之地,以后这座古城消失了。1960 年发现了它的遗址。经考证,古城荒废的原因是气候变干,水源枯竭,居民无法在当地生活。近代华北和西北经济发展的一个障碍是水源不足。未来降水如何变化,关系到它的发展前景。

评价水资源要考虑的另一个气象要素是蒸发量。尽管蒸发量的地域和时间变化较小,但蒸发量的常规观测资料不够准确,须要推算,存在着复杂的技术问题。

三、水文分析和水利建设的气候问题

水文、水资源和水利建设与气候有关。应用气候学从一个侧面推动这些问题的解决和这些学科的前进。

防洪是水利建设的重要目标。我国大部分地区的洪水来自暴雨。水库的防洪库容、坝高和

泄洪道，河流上的堤坝、水闸和渠道的设计都要考虑防洪。为此要求对大暴雨及其形成的洪水进行深入的定量分析和推断。防洪设施依其控制的面积、保护城市的规模和经济效益，采取一定的设计标准。比如，控制小面积的水坝只要控制 10 年一遇（平均 10 年可能发生 1 次）的暴雨。而重要的大坝，则要控制千年一遇的洪水。为安全起见，还要考虑到万年一遇的暴雨洪水。我国雨量记录一般只有几十年，要推断百年一遇或更长时期可能出现的暴雨，主要通过数理统计方法进行，水文上称“频率计算”。近 30 年来，引进和发展了按暴雨成因的物理因子推断“可能最大降水”。重要的水利工程要求按相应于可能最大降水的“可能最大洪水”设计。从气象学的原理和物理学的思路来推断暴雨和洪水，与频率设计所依据的数理统计方法不同。两种途径推算的结果可以互相参考，但无必然联系。

雨水汇入河流有一个过程，使流量（河流某一横截面在单位时间内通过的水量）随时间发生变化，形成流量过程。形形色色的降水过程结合流域的地面状态（面积、地形和植被等），产生不同的流量过程。对很小的流域（或汇水面积）计算流量过程，只须考虑一天以内降水量的变化，即“时程分配”；而对大的流域，要考虑几天内降水量的变化，即“日程分配”。对大多数流域，1d（或 24h）最大降水量（简称“一日暴雨”）是基本的数据，是推算其他时段暴雨量的基础。对于汇纳几条支流的大河，各支流的流量过程都会影响干流的流量过程。几条支流上的暴雨径流如果同时在干流上汇合，所谓“暴雨遭遇”，会形成很严重洪水。

河流的流量要从其汇水面积上的降水“面雨量”或“面雨深”来计算。雨量站降水量资料是各别“点”上的雨量（“点雨量”）。“点雨量”能代表多大范围？怎样由点雨量推算面雨量，是谓“点面关系”。点面关系一般规律是这样的：暴雨中心只笼罩很小面积，由中心向外，雨量先急降然后缓降。但具体的雨量分布又是很复杂的。要对当地许多次暴雨进行专门的分析，才能得出其规律。

水电站发电，水库蓄水和放水，农业灌溉和城市用水的调度，都要考虑到降水在一年内的分配来规划。水库可以把多雨时期的水拦蓄起来，以供少雨时期使用，是谓年内调节。年际调节就要掌握降水的年际变化和旱涝规律。有些水库把当年最后一场大雨拦蓄起来，留待次年春季灌溉之用。为此，要准确掌握秋天后期的大雨。

桥梁和涵洞要根据它所跨越的水流的汇水面积上的最大降水强度来设计。依其汇水面积的大小，要考虑 5 min～24 h 内某种时段的最大降水强度。这些数据要从降水自记报表经计算而得。

如果一条河上游解冻了，下游仍然封冻，上游的冰凌到下游壅积，会抬高水位，形成凌汛。黄河几乎每年都出现凌汛。为了掌握冰情，需了解各河段初冬气温下降到 0 ℃和冬末气温上升到 0 ℃的日期。气温还影响到水的密度和粘性，影响泥沙的运动、沉降和淤积的速度。受冰雪融化补给的河流，要考虑温度对冰雪融化日期及融化速度的影响。

决定大坝高程和预测河岸演变时要考虑风浪，因风浪会形成壅水，抬高水位，还会冲击堤坝和河岸。水利枢纽的建筑设计要考虑建筑气候问题。电力网设计要考虑电力网气候问题。

为了使水利工作有条不紊地进行，取得最大的经济效益和社会效益，对流域要进行规划。重大的水利枢纽也要规划。这种规划考虑的气候问题，除了上述各项具体工程的问题外，更重要的是全面考察流域的宏观气候环境，以及它和流域长期发展的相互关系——气候对流域发展的影响和流域发展对气候的影响。

第二节 平均雨量

评价水资源的重要数据是平均雨量，既包括时间平均，也包括空间平均。时间平均要“准平均”。世界气象组织规定以最近的三个年代(三个整10年)的平均值作为准平均。空间平均则由多个测站雨量计算出“面雨量”。面雨量的准确性决定于站网密度和面雨量的计算方法。

一、雨量站网密度

我国气象系统以“县县有站”为布站原则。水文系统的雨量站则沿河流分布。平原和河谷站点密，山地站点少；人口密集地区站点多，人烟稀疏的地方站点少。

站点怎样分布才有代表性?历来遵循前苏联学者所发展的一套理论：一个站的观测值不免有“随机误差”。从两个站点内插其间任意一地点的值也必有误差，即“内插误差”。两站点的距离越近，内插误差越小。内插误差是两站点的距离的函数，即所谓“结构函数”，可以从一个地区大量站点的雨量资料求得。为了使内插误差达到最小，站间的适当距离应该是使内插误差等于随机误差的那个距离。这个结论的根据是：站间距离若大于这适当距离，内插误差便过大了；另一方面，没有必要使站间距离比适当距离还小，因为这虽然可减小内插误差，甚至使内插误差比随机误差小，但也没有意义，因为不能减小总误差(总误差包含随机误差内插误差)。我国中央气象局早在建国初期就根据上述理论研究过站网密度问题。但设站主要依据管理的体制、服务的需要和生活的条件，不能完全按理论要求办。以后陆续有人研究这个问题。世界气象组织对雨量站的站间适当距离有这样的建议：温和地带平原和内陆以及热带平原为28～34 km，艰苦地区可放宽到34～54 km；以上地带的山区为12～18 km，艰苦地方可放宽到18～51 km。雨量不均匀的丘陵和海岛为7 km。干旱地方为44～113 km。用“结构函数”求得江汉平原雨量站站间适当距离应为30 km 。根据珠江三角洲6月降水量的分布得出，雨量站站间适当距离应为36 km。理论上应把面雨量作为一个随机场，研究雨量的面平均相关系数，站间相关系数，面雨量在空间上的标准差和点面相关系数等，从统计理论讨论站网密度与面平均雨量的误差的关系。

按上述理论求出的站网密度，是理论上的“可能最小内插误差”距离。事实上，有没有必要去争取这个最小误差？多大误差(多大的站间距离)就能满足实际需要而节省设站和运行的投资？却很少研究。

二、面平均雨量的计算方法

评价水资源需要面平均雨量。雨量是分布得极不均匀的一种气象要素。在大气候环境相似的条件下，山区雨量多于平原，高地雨量多于河谷低地。雨量测点多数分布在平原和河谷，如简单地求算术平均，是不能代表整个地区的真正面平均雨量的。于是，便发展了一些计算面雨量的方法。

计算面平均雨量 r_M 的基本公式，是对各点实测雨量 r_i 以该点所代表的面积 A_i 作为权重的加权平均值

$$r_M = \sum r_i A_i / \sum A_i, \tag{7.2.1}$$

以不同的方法决定 A_i，就得到不同的面平均雨量计算方法。常用的方法有：

(一)泰森(Tiessen)法，实质上是多边形面积法

出发点是使雨量站代表"最靠近它"的那块地方。换句话说，在测站雨量 r_i 所代表的面积 A_i内，任何一点与该雨量站的距离，比对于其他雨量站的距离都要近。将流域内每 3 个最靠近的雨量站连成一个三角形。流域边缘的站可利用流域外相邻的站来连接三角形。三角形的连法不是唯一的，应尽量使三个角比较均衡，不要相差太大。对各边分别作垂直平分线，这些线构成若干多边形，每个多边形的面积为 A_i。每个多边形内只有一个雨量站，其雨量为 r_i，代入(7.2.1)式，便可求得 r_M。

(二)三角形法

出发点是使雨量站代表它"周围"的地方。也就是使测站雨量代表其周围的几个(个数不定)三角形的面积。做法如泰森法那样，将相邻的 3 个站连成三角形。任一三角形的面积为 A_i，3 个顶点是 3 个站，雨量分别为 r_{i1}，r_{i2}，r_{i3}，3 个雨量的平均值是 r_i，代入(7.2.1)式即可。

(三)等雨量线法

相邻两条等雨量线的标值的平均值是 r_i，两线之间的面积是 A_i。代入(7.2.1)式即可。

(四)雨量-高程法

如果雨量随高程变化有良好关系，可以由高程推测雨量。先建立雨量 r_i 随高程 i 变化的方程式。如果方程式不能适用于整个流域则应分区建立。从地图上量出相邻两等高线之间的面积 A_i，两等高线标值的平均值是 i。由雨量-高程关系求出相应的雨量是 r_i 代入(7.2.1)式。

各种方法有其出发点和目标，也有其适用条件。比较各种方法的特点列于表 7.2.1。

表 7.2.1 计算面平均雨量各方法的特点

方法	泰森法	三角形法	等雨量线法	雨量-高程法
客观性	客观	客观	有主观性	客观
缺失少量资料的影响	降低准确性	降低准确性	不影响	影响不大
对个别错误数据的发现	不能	不能	能	能
边缘无资料的影响	有影响	有影响	影响小	影响小
计算机处理	可以	可以	人工为佳	人-机结合
适用条件	测站稠密	测站稠密	有经验	雨量-高程关系好

还有距离和高程组加权法，趋势面积分法，距离平方倒数法，改进多边形法，有限单元法和变量分析法等。Sinh 等曾利用美国新墨西哥州两个区域和英国 1 个区域的雨量资料，对 13 种方法进行比较。他们认为：在一定条件下有某一种方法比其他方法准确，不能笼统地说某种方法最好。

第三节 蒸发量

研究长时期的水分收支，如水资源、灌溉和农作物生长模式等，不能不考虑蒸发量。蒸发是不可避免的水分损失，在干旱地区尤其可观。

蒸发发生在地表面、植物和大气之间。蒸发过程需要有水分供应，还需要能量以供蒸发耗热和克服阻力。因此，蒸发关联到地表面(包括其上的植物等)热量收支，水分收支和大气中的

风和湍流。陆面和植物的蒸发的观测很困难，间接计算也较复杂，是气象、水文、地理和生物界共同关注的问题。

一、蒸发概论

蒸发指液态水的汽化的物理过程，或指汽化的水量。从水面(湖面，海面，水库，蒸发皿等)汽化的称为水面蒸发，从土壤表面汽化的称土壤蒸发，从叶面汽化的称蒸腾。从土壤及其上生长的植物汽化的，既有土壤蒸发，又有叶面蒸腾，合称蒸散或蒸散发。大面积陆地上的蒸发，包括了从土壤、水面、叶面的各种蒸发和蒸腾，称为陆面蒸发。评价水资源和规划灌溉需要陆面蒸发数据，水库的运营需要水面蒸发资料。这两种蒸发是本节要讨论的问题。

陆面蒸发的大小决定于以下几个因素：第一，陆面的湿润状况：有多少可供蒸发的水分，来自降水量分配给蒸发的水分，径流和土壤储存的水分；第二，把液态水变成水汽所需的热能，即蒸发耗热。地表面从太阳得到的辐射能，除去通过辐射过程所损失的以外，剩余的称净辐射，又叫辐射平衡或辐射差额。净辐射用于加热土壤(土壤热通量)，加热大气(湍流热通量)和蒸发地面的水分(蒸发耗热)，这三项互相制约；第三，风和湍流把已蒸发的贴近陆面的水汽输送到上层空气；第四，大气所能容纳的水汽量，决定于大气的温度和绝对湿度。综上所述，如果陆面越潮湿，净辐射越强，风越大，空气越热和越干燥，则蒸发越旺盛。

陆面蒸发的观测很困难，为了开辟计算的途径，设想一种理想情况下的蒸发量，叫做蒸发力，再加以调整，求出具体条件下的陆面蒸发量。上述影响蒸发的四个因素中，决定性的是可供蒸发的水分和可用于蒸发耗热的能量。如水分充足，蒸发量基本上决定于能量。这是一种“最大可能蒸发量”。气象学家把水分充分条件下的蒸发称为蒸发力，蒸散力或潜在蒸发。它基本上决定于净辐射可以分配给蒸发消耗的热量。本章所谈的蒸发力就采用这样的定义。

对于蒸发力有着不同的理解。分歧在以下两方面：下垫面是水面？土壤？还是有植被的地面；蒸发的能量是全部净辐射？或是净辐射减去湍流热通量和土壤热通量？还是实际气象条件下所用于蒸发的能量？布德科曾用净辐射代表蒸发力，意味着不考虑湍流热通量和土壤热通量，全部净辐射都用来做蒸发的能量。事实上湍流热通量不等于零，这样估计蒸发力是过大了。这个误差最后累积到后续步骤的经验公式的误差中。彭曼(Penman)把水面的净辐射减掉湍流热通量作为水面的蒸发力。尽管他的公式总是忽略掉水中热通量，还是比布德科的做法多考虑了一项。他进一步把水面蒸发乘上不同系数作为裸土和草地的蒸发力。不少人认为，充分湿润的陆面的蒸发量就是蒸发力。这实际上是从净辐射中减去了湍流和土壤热通量，剩下的热量作为蒸发耗热，是合理的。桑斯威特(Thornthwaite)认为，有均匀植被的、从不缺水的陆面蒸发才是蒸发力。他认为蒸发力必须包含植物蒸腾。有人认为，水面蒸发就是蒸发力。摩尔顿(Morton)在提出“互补相关陆面蒸发模型”时导出，蒸发力加实际蒸发量(陆面不一定充分潮湿)等于地面充分潮湿时的蒸发量的两倍。这里，蒸发力和陆面充分潮湿时的蒸发就不是一回事。出于蒸发力的不同的定义，有不同的计算方法。

早年常规蒸发观测资料的准确性很差。在气象台站中，百年来一直沿用 20 cm 口径的“小型蒸发皿”。由于皿是金属的，容积又小，热容很小，蒸发面(水面)温度受太阳直接辐射的影响很大，温度变化比自然水面或陆面更趋于极端。温度高时蒸发量偏大，温度低时蒸发量偏小。蒸发出来的水汽一般很快被流动的空气带走，蒸发面上总是从周围移来较干的空气。风的平流使小小的蒸发皿的蒸发总比广大的自然水面蒸发大。这些原因导致金属小型蒸发皿的蒸发量过

大而且不稳定。近数十年来，不仅研制一些特殊的用以观测水面、土壤、植被以至森林的蒸发的仪器，也改进了常规仪器。改进的方向，一是使蒸发器尽量贴近和接触地面。如把蒸发器埋在地下，器口与地面取平，以代表地面状况；二是扩大蒸发面。如蒸发面面积从 10 m^2 至 100 m^2 的蒸发池，以便减少平流的影响。世界气象组织的文件指出，面积达到 10 m^2 以上的蒸发池的蒸发量，开始接近自然水面蒸发。

水面蒸发可由大型蒸发池的资料直接观测到，或由改进了的常规蒸发器如 E_{601}蒸发器经订正求得。蒸发力是一种理想值，只能通过计算求得。陆面蒸发则要通过蒸发力或水面蒸发和气象条件，结合地面状况推求。

二、水面蒸发观测的比较

气象站长期以来使用 20 cm 口径金属小型蒸发皿。少数站也有用 80 cm 金属大型蒸发盆。20 世纪 50 年代后期，水文站网试行并推广 E_{601}(金属)蒸发器。1988 年从规范上把它用固定下来作为常规仪器。为了避免阳光照射引起急剧升温，后来试用玻璃钢的 20 cm 口径蒸发皿和 E_{601}蒸发器。水利部先后在十多个地点，南京地理研究所在宜兴建立蒸发实验站，设置了面积为10 m^2，20 m^2，以至 100 m^2 的蒸发池，以配合气象水文观测。有些水库有飘浮蒸发器。这些改进了的设备能提供基本准确的水面蒸发数据。

俄罗斯长期使用 ГГИ-3000 蒸发器，面积为 3 000 cm^2。美国用 A 级蒸发盆。两者测量的水面蒸发比较准确，后者受到世界气象组织和国际水文科学协会的推荐。

为了方便地利用各地常规(小型)蒸发皿(器)的资料，将蒸发实验站大型蒸发池(代表自然水面蒸发)的数据 E_L，和同时同地小型蒸发皿 E_S 的数据进行对比，求出折算系数

$$K = E_L/E_S. \tag{7.3.1}$$

其他地方小型蒸发皿的蒸发量乘上 K 便可换算成水面蒸发量。折算系数实际上随气象条件而变化。

(一)常规金属蒸发皿数据的折算系数

表 7.3.1 是用宜昌蒸发实验站 1984～1994 年间资料求得的，将金属和玻璃钢的常规蒸发器资料折算成水面蒸发。用 20 m^2 蒸发池资料代表水面蒸发，和同期几种小型蒸发器资料对比，求出折算系数，系数的符号：K_{20}代表 20 cm 口径金属蒸发皿的，K_{80}代表 80 cm 口径金属蒸发器的，K_{601}代表 E_{601}金属蒸发器的。

表 7.3.1　小型蒸发器资料换算成水面蒸发的折算系数(宜昌)

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
K_{20}	0.69	0.57	0.53	0.49	0.59	0.60	0.63	0.70	0.77	0.75	0.74	0.75	0.65
K_{80}	1.15	0.80	0.72	0.63	0.72	0.74	0.77	0.83	0.96	1.02	1.06	1.19	0.84
K_{601}	1.03	0.87	0.84	0.80	0.91	0.93	0.92	0.97	1.05	1.03	1.00	1.02	0.95

可以看到，口径大的 80 cm 蒸发器比小的 20 cm 蒸发皿较接近水面蒸发，也较稳定。E_{601}比其余两种蒸发器接近水面蒸发，也更稳定。

(二)金属和玻璃钢常规蒸发器的折算系数

表 7.3.2 是用广州蒸发实验站 1983～1984 年间资料求得的，将金属和玻璃钢的常规蒸发器资料换算成水面蒸发的折算系数。用 20 m^2 蒸发池资料代表水面蒸发。系数的符号：K_{J20}代

表 20 cm 口径金属蒸发皿的，K_{B20}代表 20 cm 口径玻璃钢蒸发皿的，K_{J601}代表 E_{601}金属蒸发器的，K_{B601}代表 E_{601}玻璃钢蒸发器的。

表 7.3.2 小型蒸发器资料换算成水面蒸发的折算系数(广州)

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
K_{J20}	0.66	0.64	0.42	0.46	0.48	0.60	0.63	0.69	0.72	0.78	0.74	0.78	0.63
K_{B20}	0.77	0.66	0.47	0.53	0.55	0.70	0.74	0.82	0.86	0.93	0.86	0.90	0.73
K_{J601}	0.90	0.83	0.76	0.85	0.85	0.98	0.98	1.02	1.08	1.08	1.06	1.03	0.95
K_{B601}	1.03	1.05	1.08	1.14	1.09	1.07	1.06	1.05	1.06	1.03	1.03	1.06	1.06

可以看到，玻璃钢的比金属的稳定。20 cm 口径的蒸发皿玻璃钢的比金属的接近于水面蒸发。

三、蒸发力的推算

(一)推算蒸发力的原理

水量平衡和热量平衡的原理是推算蒸发力的依据。从湍流热交换也可以计算蒸发量。

1. 区域水量平衡原理

区域在一个时期内的水量平衡方程式

$$r = E + \Delta W + f, \tag{7.3.2}$$

r 是降水量，E 是蒸发量，ΔW 是土壤水分的增量，f 是径流，包括地面和地下的出流和入流。

对一个闭合流域，如考虑 1 年或多年时期，土壤水分的增量接近于零，水量平衡方程式具有最简单的形式。利用雨量站测得的降水量和从水文站测得的径流量，蒸发量就可以作为方程式的余量而求得。这是计算蒸发量的传统方法。然而，要注意以下问题：第一，在湿润地区，降水和径流的量级比蒸发的量级大，由两个大量(它们的误差也较大)之差求一个小量，误差会很大；第二，雨量是时空分布不均匀的要素，求出的面雨量误差也较大；第三，如果考虑的时段不到 1 整年，水量平衡方程式中土壤水分增量不可忽略；第四，如果研究的地域不是闭合流域，径流项不那么简单，还要考虑通过流域边界的入流和出流。

2. 土柱水量平衡原理

对一个小截面积的土壤柱体，如测得降雨量和进出土柱的水量，蒸发量可以作为余量求得。农业试验站设置的土壤蒸发器就利用这个原理。水文单位所设的水量平衡场，就取一个小面积的场地，观测水量平衡若干分量，通过土柱水量平衡法来计算未测的分量和有关参数。

3. 地表热量平衡原理

地表热量平衡方程式是

$$B = Q + LE + S, \tag{7.3.3}$$

B 是净辐射，Q 是湍流热通量，L 是蒸发潜热，E 是蒸发量，LE 是蒸发耗热，S 是土壤热通量。

测量出除蒸发耗热以外的各分量，就可把蒸发耗热及相应的蒸发量求出。如果计算的时段为 1 年或多年，土壤热通量可视为零，方程式可简化。不过，净辐射和湍流热通量都是比较难测量的，往往通过间接计算求取，误差也较大。

许多经验公式把蒸发量表示为温度的函数，就是因为温度与净辐射和湍流热通量成正变，而考虑 1 年以上时期土壤热通量近似于零。

4. 湍流扩散原理

蒸发面的水分汽化后，必须由空气的运动把水汽从较湿的贴地层向较干的上层扩散，才能继续蒸发。这样，蒸发的速率也依赖于上下气层湿度的差异和空气垂直运动的强度，也就是决定于湿度的垂直梯度和湍流的强度。湍流强度与风速和温度的垂直梯度有关。温度、湿度和风速三者的垂直梯度都可以在小气候观测中测定，但这种观测只在短期考察中进行，而不是常规观测。为了计算长期的蒸发量，要设法从短期考察的资料推断长期的情况。一种常用的方法就是利用风与湍流有正变关系，用常规观测的风速代替湍流强度，这就是道尔顿(Dolton)公式

$$E_0 = (e_s - e_d)f(u). \tag{7.3.4}$$

式中 e_s 是蒸发面温度相应的饱和水汽压，e_d 是实际水汽压，$f(u)$是风速 u 的函数。

5. 涡旋相关原理

贴地层的湍流涡旋造成空气运动的脉动(高频率的微观的变化)和绝对湿度的脉动。若空气的上下运动和绝对湿度的增减成正相关，即向上的运动往往和湿度的增加同步，就能把水汽向上输送，促进了地面的蒸发。空气和湿度的脉动是微观的，只能利用精密仪器作短期的野外考察，并由短期资料推断长期情况。

(二)推算蒸发力的方法

1. 彭曼公式

以热量平衡方程式为基础，结合湍流交换理论和若干经验关系式，经复杂的代换，导出蒸发力计算公式。历经后人改进，使其中的参数适合各地情况，获得广泛应用。

E_0 通常表示蒸发力。这里用水面蒸发代替蒸发力。考虑多年平均，略去水中热通量，水面净辐射 B 等于蒸发耗热 LE_0 加湍流热通量 Q。

$$B = LE_0 + Q, \tag{7.3.5}$$

若求得 Q，便可得到 E_0。但 Q 很难得到，引入鲍文比$\beta= Q/LE_0$，且其分子和分母都用湍流扩散方程式代入

$$\beta = \rho c_p k_h(\partial\theta/\partial z)/\rho L k_e \partial q/\partial z)$$

$$\approx (c_p/L)\Delta\theta/\Delta q \tag{7.3.6}$$

$$\approx (c_p/L)(T_s - T_a)/(e_s - e_d), \tag{7.3.7}$$

式中，ρ 是空气密度；c_p 是定压比热容；k_h和 k_e 分别是热量和水汽的湍流系数，接近相等；θ 是位温；z 是高度；q 是比湿；T_s 是蒸发面温度；T_a 是气温；e_s 是蒸发面温度对应的饱和水汽压；e_d 是实际水汽压。

将(7.3.5)和(7.3.6)两式联系起来，并将净辐射 B 除以蒸发潜热 L 变成净辐射的蒸发当量 B_L，得

$$E_0 = B_L/(1 + \beta). \tag{7.3.8}$$

将各项常数及已知关系代入(7.3.7)式，得

$$\beta = \gamma(T_s - T_a)/(e_s - e_d), \tag{7.3.9}$$

式中

$$\gamma = 0.358p/590 , \tag{7.3.10}$$

上式中 p 是气压，T_s 和 e_s 不常观测，分别用气温 T_a 和对应的饱和水汽压 e_a 代替。

引入干燥力

$$E_a = (e_a - e_d)f(u), \tag{7.3.11}$$

式中，$f(u)$是风速的经验函数。将(7.3.10)式和道尔顿公式(7.3.4)相比，得

$$E_a/E_0 = 1 - (e_s - e_a)/(e_s - e_d), \tag{7.3.12}$$

将(7.3.9)式代入(7.3.8)式，得

$$E_0 - B_L/\{1 + \gamma[(T_s - T_a)/(e_s - e_a)][(e_s - e_a)/(e_s - e_d)]\}. \tag{7.3.13}$$

令

$$\begin{aligned}\Delta &= (e_s - e_a)/(T_s - T_a) \\ &\approx de_a/dT_a,\end{aligned} \tag{7.3.14}$$

式中，Δ 原本是从蒸发面指向空气的水汽压梯度和温度梯度之比，即单位温度差的水汽压差。改用饱和水汽压随温度变化的曲线的斜率代替。将 Δ 连同(7.3.12)式代入(7.3.13)式，最后得到

$$E_0 = (\Delta B_L + \gamma E_a)/(\Delta + \gamma). \tag{7.3.15}$$

这是彭曼公式，物理意义很明显：净辐射 B_L 的系数是$\Delta/(\Delta+\gamma)$，意味着净辐射以这样一个权重在产生蒸发力中起作用。干燥力 E_a 的系数是 $\gamma/(\Delta+\gamma)$，意味着干燥力以这样一个权重在产生蒸发力中起作用。前者可以看成是产生蒸发力的热力因素，后者可以看成是产生蒸发力的动力和水分因素。彭曼推导公式巧妙之处在于，把很少观测的水汽和温度的垂直梯度的比，代之以量纲相同的饱和水汽压随温度的变化率，而后者是温度的已知函数，由实测气温就可决定。净辐射由常规观测资料藉助经验公式求得。γ 是"湿度表常数"，仅由气压决定。E_a 反映空气可能容纳水汽的能力和从贴地层输送水汽到上层的动能力，由经验公式求得。

彭曼将 E_0乘以 0.9 作为裸地蒸发力。视季节乘以 0.6 至 0.8 作为草地蒸发力。

将彭曼公式计算的蒸发力和准实测的水面蒸发比较如下：英国以水量平衡法求得的蒸发为"实测"，误差为 5%～10%；云南年蒸发量以 E_{601}值为实测，误差平均为 6%，最大为 12%；彭曼公式在世界各地得到广泛的应用。我国曾用它先后计算了我国东部 125 个地点，全国 400 个地点，晋、冀、鲁、豫、陕和宁夏地区的蒸发力。

我国学者对彭曼公式作了结合本地情况的研究和修正。

(1)修正估算净辐射的经验公式。根据当地日射资料(总辐射和晴天辐射)和理论数值(天文辐射和理想大气辐射)，对照常规观测资料(日照百分率，云量和湿度)和地理参数(纬度和海拔高度)，修正了估算地面吸收总辐射，有效辐射和净辐射的经验公式。

(2)修正计算干燥力 E_a的经验公式。彭曼 1956 年对 E_a 的计算公式作过修正。我国学者用水文站的 E_{601}蒸发器和 20 m² 大型蒸发池的资料作为水面蒸发实测值，结合饱和差和 10 m 高度风速资料，修正了计算 E_a 的经验公式，或加上海拔高度订正，使之适合于各地的情况 。

(3)制作海拔高度和温度查算权重系数 $\Delta/(\Delta+\gamma)$和$\gamma/(\Delta+\gamma)$的图表。因为 Δ 是温度的函数，γ 是气压的函数，主要决定于海拔高度。据此制作此项图表 。

(4)将公式原来针对水面改成针对土壤，用于计算陆面蒸发力。在辐射平衡方程式中采用土壤或植被的反照率，用彭曼公式计算农田和植被的蒸发力 。

2. 布德科综合法

以湍流扩散理论结合热量平衡方程式导出公式。水汽湍流扩散方程见(7.3.6)式。对高度积分，

$$E_0 = \rho(q_S - q_A)/\int_s^h (dZ/k_e), \tag{7.3.16}$$

积分限是从 S(蒸发面)到 h(大约是 2 m)。q_S是蒸发面温度对应的饱和比湿,q_A 是空气的比湿。引入“外扩散系数”

$$D = 1/\int_s^h (dZ/k_e). \quad (7.3.17)$$

采用 D 的平均值 0.63 cm/s,并将比湿换算成水汽压,得到

$$E_0 = 16.7(e_s - e_d) \quad (\text{mm/月}) \quad (7.3.18)$$

此式与道尔顿公式非常相似,只是没有因子 $f(u)$,多了常系数 16.7。式中 e_s是蒸发面的温度相应的饱和水汽压,很少实测,要以地表热量平衡方程式为基础,经过一些理论的和经验的公式的转换,还要迭代逼近,最后用常规观测资料求得 。

由于采用了许多近似的代换,月蒸发力计算结果的误差可达 7%～20%。年蒸发力的误差约 5%。我国学者曾借助国内资料修正辐射平衡和热量平衡各分量的计算式,计算了全国暨黑龙江的年、月蒸发力 。

3. 经验公式

以蒸发的物理过程为依据,把实测蒸发量与有关的气象要素或地理参数建立统计关系公式。在 1960 年代以前,多建立蒸发量与温度的联系。后来,大型蒸发池资料增加,又有水面上的气象梯度观测,遂建立起许多更准确的经验公式。

(1)蒸发力与气温的关系。这是基于蒸发耗热和净辐射有关,而气温的升降能反映净辐射的变化。

①桑斯威特和马塞(Mather)把蒸发力表成气温的函数,由蒸发力、土壤蓄水量、实际蒸发量、降水量和径流计算一地区逐日、逐月、逐年的水分平衡。复杂的计算都已制成图表,便于查用。此法在许多国家得到广泛的应用。将计算结果和北京“实测”蒸发力比较,误差不小。原因是该法把蒸发力表成气温的函数,意味着最热月蒸发力最大。但华北并非如此,华北 7 月气温虽然最高,但阴雨天多,蒸发力并不最大。5 月温度虽非最高,但晴天多、干燥、蒸发力倒是最大。

②我国 1959 年进行自然区划时,中国科学院提出

$$E_0 = 0.16 \sum t, \quad (7.3.19)$$

式中 $\sum t$ 是日平均温度大于等于 10 ℃的积温。用此式计算了全国许多地方的蒸发力,应用于气候区划。也有人把自变量 $\sum t$ 改成 0 ℃以上积温,系数作相应修改。

③ 丘尔克(Тюрк)公式

把年蒸发力表成年平均气温的三阶抛物线函数,再结合降水量求出蒸发量。我国学者用它计算了许多地点的蒸发力,用水量平衡法的“实测值”进行检验,认为效果尚可,略为偏小。原因是该公式用年平均温度做自变量,意味着冬、夏温度各占一半权重,但事实上冬半年蒸发量很小,其温度不应占一半权重。

④ 对高桥公式增加海拔高度订正后应用 。

(2)蒸发力与饱和差及风速的关系。类似道尔顿公式和布德科的综合法,

$$E_0 = \alpha(e_s - e_d)f(u), \quad (7.3.20)$$

式中,α 是系数,e_s 是蒸发面温度相应的饱和水汽压,e_d 是实际水汽压,$f(u)$是风速 u 的函数。用蒸发实验站资料拟合出

$$E_0 = 0.22(e_s - e_d)(1 + 0.32u^2)^{1/2} \quad (7.3.21)$$

式中，e_d 和 u 是水面上方 1.5 m 的实际水汽压和风速 。

通过风洞实验，拟合出类型如(7.3.20)式(只是 $f(u)=1$)的系数

$$\alpha = [2.77 + 1.56u^2 + 0.25\ (T_s - T_a)]^{1/2} 10^{-1}, (\mathrm{mm/(d \cdot hPa)}) \quad (7.3.22)$$

$$或\alpha = [2.45 + 1.56u^2 + 0.20(T_{Vs} - T_{Va})]^{1/2} \times 10^{-1}, (\mathrm{mm/(d \cdot hPa)}) \quad (7.3.23)$$

式中，d 代表一日，T 是温度，T_v 代表虚温。下标“S”代表水面，“a”代表水面上方 1.5 m 处的值。用广州蒸发实验站和新疆猛进水库实测资料验证，用此 α 值计算蒸发力的误差不超过 8%。

四、陆面蒸发的推算

有些实验站设置了载土的大型蒸发器来观测土壤蒸发，甚至在器中栽培植物以观测蒸散量，是谓“蒸散测量器”(lysimeter)，例如，“渗漏蒸发器”。还有对森林蒸发进行观测。它们的观测值比装水的蒸发皿(池)较接近蒸散或土壤蒸发。但此类观测只能在个别地点进行，无法反映复杂的下垫面的陆面蒸发。陆面蒸发依仍赖间接计算。

(一)水热平衡途径

1. 傅抱璞根据蒸发的物理概念和水热平衡原理，以量纲分析方法推导出陆面蒸发公式。其思路是：蒸发量 E 与蒸发力 E_0 和降水量 r 有关。在蒸发力保持一定的情况下，蒸发量随降水量的变化与降水量有关，还与蒸发力用于蒸发以后的“剩余蒸发力”(E_0-E)有关，即

$$\partial E/\partial r = f(E_0 - E, r). \quad (7.3.24)$$

在降水量保持一定的情况下，蒸发量随蒸发力而变化，还与降水量用于蒸发以后的“剩余水分”($r-E$)有关，即

$$\partial E/\partial E_0 = f(r - E, E_0). \quad (7.3.25)$$

由水热平衡原理决定边界条件：若蒸发达到蒸发力，即$E=E_0$，没有剩余蒸发力了，应有 $E_0-E=0$，$(E_0-E)/r=0$。此时，蒸发量不再随降水量而变化，$\partial E/\partial r=0$。另一方面，若全部降水量都已蒸发，$E=r$，再也没有剩余水分，$r-E=0$，$(r-E)/E_0=0$，此时，蒸发量不再随蒸发力而变化，即$\partial E/\partial E_0=0$。

根据量纲分析的 π 定理，偏微分方程两边的物理量纲应该相等，再利用上述边界条件，得到上述微分方程组的解是

$$\begin{aligned} E &= r\{1 + (E_0/r) - [1 + (E_0/r)^m]^{1/m}\} \\ &= E_0\{1 + (r/E_0) - [1 + (r/E_0)^m]\}^{1/m}. \end{aligned} \quad (7.3.26)$$

式中雨量可实测，蒸发力要由其他方法求得。m 是由下垫面性质决定的待定的“下垫面参数”。有了这三个量便可求得陆面蒸发。

此式的出发点和推导过程都是严谨的，但没有提出如何决定下垫面参数。谭冠日等根据云南 6 个小流域的资料，用水量平衡法求得的值和 E_{601}观测值作为蒸发量的“实测值”，用修正的彭曼公式求得蒸发力，检验了傅抱璞公式，并提出了山区下垫面参数的计算方法 。

山区的下垫面参数是这样决定的。在山区下垫面各种状况中，以地形起伏程度对蒸发量影响最大。在降水量和蒸发力一定的条件下，地形起伏大的地方，降水很快变成径流，蒸发较小；反之，地形平缓的地方，降水变成径流很缓慢，蒸发就较大。对此，提出了“地形起伏度”的概念——单位距离内地形的平均高度差。下垫面参数的定量表达法是：在等高线间距为 Δh 的大比例尺地图上，在研究的流域边界内，绘出稠密的等距离的横线和竖线。读出全部横线和竖线

与等高线的交点数目 N。每一交点意味着高度改变 Δh。横竖线长度总和是 L。地形起伏度

$$U = N\Delta h/(L/k), \quad (7.3.27)$$

式中 k 是地图比例尺。对每个流域,先由实测的 r,计算得或实测的 E 和 E_0,由傅抱璞公式反算出 m。另一方面,独立计算 U。将 6 个流域的 m 和对应的 U,按最小二乘法,并考虑到水热平衡的要求,拟合出经验公式

$$m = (225/U) + 1. \quad (7.3.28)$$

利用此公式,由大比例尺地图即可估计山区的下垫面参数。

后来傅抱璞进一步探讨了下垫面参数 m 的一般计算方法 。当降水 r 全部变成径流 f 而使蒸发量为零时,径流系数 $y=f/r=1, m=1$。当 $y=0, m\to\infty$。这说明 m 是 f 和 r 的函数。据此建立偏微分方程,根据量纲分析原理和上述边界条件,解出

$$m = 1 + Cr^a[(1-y)/y]^n, \quad (7.3.29)$$

式中 a, C 和 n 是待定系数,决定于下垫面的特性。从《中国水分气候分布图》读出网格点上的降水量 r、径流量 f 和蒸发量 E,可反算出 m。按三类地形(山地及高原,平原,盆地)分别求出其 3 个系数列于表 7.3.3。

拟合这些参数的相对误差平均为 7.3%,个别达 18.5%。

表 7.3.3 下垫面参数公式中不同地形的系数

地形	a	C	n
山地及高原	1.210	0.2928	0.393
平原	1.541	0.4852	0.140
盆地	0.403	0.9518	−0.530

2. 崔启武公式。在辐射平衡 B 一定的条件下,蒸发量随降水量的变化率与辐射平衡用于蒸发耗热后的剩余热量$[1-(LE/B)]$成正比。同时,也与蒸发量占降水量的份额(E/r)成正比,即有

$$\partial E/\partial r = [1-(LE/B)]E/r. \quad (7.3.30)$$

另一方面,在降水量 r 一定的条件下,蒸发耗热随辐射平衡 B 的变化率,与降水量用于蒸发后的剩余水分$[1-(E/r)]$ 成正比,也与蒸发耗热占辐射平衡的份额(LE/B)成正比,即有

$$\partial LE/\partial B = (1-E/r)LE/B \text{。} \quad (7.3.31)$$

在一定边界条件下解出

$$E = Br/(B + Lr + A), \quad (7.3.32)$$

式中,A 是景观参数,相当于前述下垫面参数。作者对特定地方求出了此参数,但没有提出决定景观参数的一般方法。

3. 巴格罗夫(Багров)假定蒸发量随降水量的变化率与蒸发力用于蒸发后的剩余额成正比。他用饱和差表示这个剩余额,又加上指数 n 反映下垫面状况,列出了微分方程。此方程只在$n=1$和 $n=2$的特定条件下才有显函数的解:蒸发量是降水量和蒸发力的函数。这个方程在实际中难于应用。刘振兴加以修改,用$m(=1/n)$作为下垫面参数,使得原方程得到显函数的通解。为使方程式形式上简单些,记$1/(1-m)$为 k,有

$$E = E_0\{1 - [1 - m(k - r/E_0)]^k\}. \quad (7.3.33)$$

傅抱璞公式的第一个方程和巴格罗夫公式有相似之处。

如果有径流产生,表明降水量超过蒸发力,地面水分不缺。这时蒸发量只决定于蒸发力,而

与降水量无关。

4. 互补相关法。Morton 提出，若不考虑土壤热通量，净辐射只用于蒸发和湍流热通量，蒸发量 E 增加则湍流热通量 Q 减少，反之亦然。于是

$$dE + dQ = 0. \tag{7.3.34}$$

湍流热通量的改变(dQ)必引起气温的相应改变，而气温的改变必引起蒸发力的相应改变(dE_0)，上式成为

$$dE + dE_0 = 0. \tag{7.3.35}$$

积分后得

$$E + E_0 = C. \tag{7.3.36}$$

边界条件：水源充分条件下的蒸发量 E 记为 E_W，也就是 E_0，有 $E_W = E_0$，此时上式成为

$$C = 2E_W, \tag{7.3.37}$$

$$E + E_0 = 2E_W. \tag{7.3.38}$$

设想一个充分潮湿的表面具有“平衡温度”T_P，在此温度下由热量平衡方程式计算的蒸发量和由水汽输送方程计算的蒸发量相等。

潮湿表面热量平衡方程式

$$B = E_0 + \lambda f_t(T_P - T_a), \tag{7.3.39}$$

式中 B 是净辐射，右端第二项是湍流热通量，λ 是热传导系数，f_t 是水汽输送系数。各量均由常规观测资料代入经验公式或半理论关系求得。T_a是气温。未知的只有 E_0 和 T_P。水汽输送方程

$$E_0 = f_t(e_{T_P} - e_{T_d}), \tag{7.3.40}$$

e_{T_P}是 T_P 对应的饱和水汽压，是 T_P 的已知函数。e_{T_d}是露点温度 T_d 对应的饱和水汽压，由实测露点温度决定。在两式联立的条件下，结合一些经验半经验公式，E_0 和 E_W 可以求出。通过(7.3.38)式可求出蒸发量 E。

用河北省衡水水资源实验站资料检验此法，认为年蒸发力与彭曼公式所得相差 5%。与实测值相差不到 10% 。

(二)湍流扩散途径

康斯坦丁诺夫(Константинов)将水汽湍流扩散方程加以变换，把蒸发量表成风速，水汽压和湍流交换系数的函数，以便通过实测资料加以计算。经过比较发现误差较大。

(三)经验公式

1. 布德科水热平衡方程

先前有奥利捷科普公式和斯莱伯公式，通过水热平衡法由降水量和径流量求出蒸发量，进而拟合出蒸发量，蒸发力和降水量相互关系的经验公式。他们使公式的边界条件符合水热平衡的要求：在极干热的条件下，蒸发量趋近降水量；在极冷湿的条件下，蒸发量趋近于零。布德科考察了实际资料，认为将这两个公式求几何平均更好。他还用净辐射 B 的蒸发当量 B/L 代表蒸发力。这个公式是将两个满足水热平衡条件的公式平均而得的，自然也符合水热平衡的要求，但它不是从水热平衡原理推导出来的，名为“水热平衡联系方程”，实质上是经验公式。

$$\begin{aligned} E &= [r(1 - e^{-B/Lr})(B/L)\mathrm{th}(Lr/B)]^{1/2} \\ &= [(Br/L)\mathrm{th}(Lr/B)(1 - \mathrm{ch}(B/Lr) + \mathrm{sh}(B/Lr)]^{1/2}, \end{aligned} \tag{7.3.41}$$

式中 th 是双曲正切，ch 是双曲余弦，sh 是双曲正弦。

这里将净辐射代表蒸发力，就忽略了湍流热通量和土壤热通量。在长达 1 年以上的长时期是可以忽略土壤热通量的，但不应无视湍流热通量。在地温高于气温时，地表面有热量通过湍流传给空气。当地温低于气温时，气层稳定，湍流停止，空气不能通过湍流把热量传给地面。所以，无论以日，月，或年计，都从地面把热量传给空气，湍流热通量不能忽略不计。这个系统性误差实际上是存在的，并累积到后续步骤中了。

他用世界上许多地方的资料检验此公式，认为拟合良好。很多地方将此式计算的结果用水热平衡法的结果加以检验，表明其相对误差约为 10%。

2. 布德科的土壤蒸发公式

$$E = E_0, \qquad (S \geqslant S_0) \tag{7.3.42}$$

$$E = E_0 S/S_0, \quad (S < S_0) \tag{7.3.43}$$

S 是植物活动层(地面至 1 m 深)的有效含水量。S_0 是一个临界值。第一式的意义是：当土壤充分潮湿时，蒸发量等于蒸发力。第二式的意义是：当土壤含水量低于临界值时，蒸发量的相对值等于含水量的相对值。

(四)各种方法的比较

既然蒸发力和陆面蒸发的直接观测不够充分和不够准确，用什么标准去衡量某一个方法的好坏呢？第一，寻求相对可靠的实测值。大面积蒸发池的实测值是较可靠的水面蒸发量，接近蒸发力；装载有泥土和栽种有植物的蒸发器的观测值可以代表小面积的土壤蒸发；第二，由物理意义明确，原始资料可靠的方法计算蒸发量代替实测值。如根据雨量和径流量的实测值通过水量平衡法求得的值作为闭合流域的陆面蒸发；第三，用已经充分验证的方法的计算值为准，去检验其他方法；第四，分析一种方法的理论基础是否牢靠，推导过程是否严密，求取参数的原始数据是否可靠；第五，要求高精度和要求操作简便常常有矛盾，应视必要性和可能性加以折中。如果对大范围的年、月蒸发量只要有个概括的了解，可以用简便的方法求取。例如，桑斯威特和马塞的方法只用平均气温就能求出可用的结果。

布德科综合法计算的蒸发力和彭曼公式计算的接近。冬半年布德科综合法的计算值大于彭曼公式的，夏半年相反，但两法结果差别不大。布德科综合法和中国科学院用积温的经验公式比较，在湿润的长江和珠江流域彼此接近。积温方法计算的，在干旱的北方偏小，在干燥地区和沙漠地区偏小更甚。用这两种方法计算了黑龙江的蒸发力，结论基本相同。

用斯莱伯公式，奥利捷科普公式，布德科的“水热平衡联系方程”和巴格罗夫公式计算了上海、江苏和浙江一些地方的年蒸发量。和水文图集的年蒸发量比较，布德科水热平衡方程和巴格罗夫公式结果接近，误差较小。斯莱伯公式结果偏小，奥利捷科普公式结果偏大。至于月蒸发量，布德科水热平衡方程和巴格罗夫公式颇一致，各月计算值的全年合计值和独立计算的全年值相差不到 5%，都比康士坦丁诺夫的方法好。有的研究认为斯莱伯公式误差较大，奥利捷科普公式稍好。布德科水热平衡方程在干燥气候条件下误差介于两者之间，在潮湿气候下较好。

以云南 6 个小流域实测的年雨量和径流量，通过水量平衡方程式求出年蒸发量；结合用 E_{601}蒸发资料校验和修正的彭曼公式所计算的蒸发力为标准，比较了刘振兴、崔启武和傅抱璞公式。表明傅抱璞公式误差较小。

以北京农业气象站冬小麦拔节期土壤充分潮湿时的蒸发量作为蒸发力，对彭曼公式中干燥力的几个不同的经验公式进行检验。认为彭曼原式的计算结果偏大，1956 年修改式结果偏

小;陶祖文的修正最好。对月蒸发量的计算,布德科综合法的结果和彭曼公式接近。桑斯威特法计算值夏季比彭曼公式大,冬季则较小。年蒸发量的计算,如以彭曼法经陶祖文修正的为准,布德科法偏大 2%,桑斯威特法偏小 12.5% 。

在净辐射计算中,彭曼是按气温计算地面有效辐射的,而布德科则考虑了地温和气温的差别,计算的有效辐射较准确。彭曼公式若考虑到这一点,计算结果有改善。

美国农业研究局 1972 年以蒸散测量器所导出的蒸发力为标准,检验了 14 种仪器和方法。在俄亥俄州的北阿巴拉契亚实验汇流区,一个称重蒸散测量器安置在被紫花苜蓿覆盖的地面上,观测了 15 年。把土壤充分湿润时的观测值作为蒸发力。其余的观测值则要加订正才算是蒸发力。求出累年的 5 d 滑动平均值,得到年变化的一条"标准曲线"。此曲线的整个水平比周围由草皮覆盖的地面的蒸发力系统偏大,但日际的相对变化是可靠的。用桑斯威特法求出的年平均值修正曲线的平均值,但保留曲线的日际变化特征。后者称为"订正曲线"。把 14 种方法的逐日值和逐月值分别对"标准曲线"和"订正曲线"的相应值求均方差,以检验每种方法的准确性。表 7.3.4 只列出本节提到的几种方法。

表 7.3.4 各种方法的蒸发量对"标准曲线"和"订正曲线"的均方差

方法或仪器	逐日值		逐月值	
	对标准曲线	对订正曲线	对标准曲线	对订正曲线
桑斯威特法	0.04	0.02	1.28	0.64
丘尔克公式	0.03	0.01	0.75	0.47
彭曼公式	0.02	0.01	0.61	0.45
湖面蒸发	0.03	0.01	0.93	0.23
A 级蒸发盆	0.03	0.02	0.44	0.51

所列出的 3 种方法中以彭曼公式的均方差最小,最准确。

第四节 水资源的不稳定性及暴雨极值的统计推断

一、水资源的不稳定性

决定水资源水平(平均状况)的两个主要气象因素是降水和蒸发。蒸发量年际变化较小,降水量年际变化较大。降水量随时间的变化由以下几种时间尺度不同的变化构成:第一,长期变迁。时间尺度在几十年以上。第二,循环变化。时间尺度从几年至几十年。第三,短期变化。时间尺度在几年之内。第四,随机波动。时间尺度在一年以内。它们都会引起水资源的不稳定。时间尺度越长的变化,覆盖的范围也越大。从另一个角度,把降水看成随机变量,则用均方差(或离差系数),偏态系数以至峰态系数来表示其概率分布,描述其不稳定性。

降水的长期变迁对水资源发生明显影响。古远的例子前面已谈过。近代降水变迁对水资源影响的事例比比皆是。近 50 年来东北地区,黄河流域和华南地区有干旱化的趋势。其中东北区夏旱更显著 。京津唐地区 20 世纪 80 年代水资源降低到上世纪以来的最低水平。山东 1956 至 1990 年间水资源平均每年减少 1.18 %,即 $3.57\times10^8 m^3$,尤以地表水减少为甚。黄河的径流每年减少 2.16%,即 $4.87\times10^8 m^3$,近年断流的频率越来越高,时间越来越早。另一方面,长江流域和淮河流域却有湿润化的趋势,其中长江流域变化明显。

降水的循环变化可以华北为例。北京1980～1984年少雨，年雨量比准平均少22%，径流量比准平均少47%。同5年期天津年雨量比准平均少13%，径流量少37% 。

降水的短期变化和显著的波动表现为旱涝。我国东部夏季降水正常的年份只有22.5%。大范围旱或涝每2～3年即发生一次。1954，1956，1959，1968，1969，1980，1989年是大范围旱涝年；1954和1989年是特大涝年；1956华南和长江流域大旱，江淮、黄河流域及东北是大涝 。京津唐地区丰水的1959年水资源相当于多年平均的2倍；枯水的1968年只相当于多年平均的42% 。对黄淮海地区和我国110°E以西地区近30年降水资料分析表明，多雨地区和多雨季节降水量年际变化较小，水资源比较稳定。反之，少雨地区和少雨季节降水量年际变化较大，水资源不稳定。严重的旱涝对社会经济以至政治发生重大影响。例如，一般把明朝灭亡的原因归之于明朝末年的腐败，农民起义，吴三桂引清兵入关等。这无疑是直接的、社会的原因。但是，自然界的原因却很少被注意。最近，复旦大学曹树基教授大胆提出，气候异常引起的生态环境变化，是明朝崩溃的主要原因之一。他指出，明朝后期至末年，气候异常干旱。从万历帝到崇帧帝的半个多世纪，中国发生多次大旱甚至全局性的特大干旱。仅崇帧年间，华北，华中和江南就发生全局性的特大干旱数次。华北旱灾的年份占崇帧时期的50%。灾区人口大量死亡。在大范围而频繁的旱灾的影响下，崇帧末年许多地区发生大范围的蝗灾。仅在北方，就形成长达一千公里、宽达数百公里的蝗灾地带，赤地千里，寸草无存，经济崩溃。干旱又是鼠疫的温床。灾荒和鼠疫造成人口大量死亡，社会动乱。崇帧17年全国人口只有崇帧3年时的74%。北京的鼠疫使全城人口死亡超过40%。李自成进攻北京时，城墙上平均每3个垛口才有1个羸弱的士兵把守。清兵入关时，明朝无法组织兵源抵抗。

为了掌握降水的随机波动对水资源的影响，需统计不同保证率的年降水量。农业、工业和人民生活所需的降水量，保证率应该在75%以上。不能按多年平均降水量衡量水资源，因为平均值的保证率大约只有50%。

全球变暖及伴随的气候长期变迁已成为社会关注的问题。以大气环流模式所预测的未来气候情景为基础，用逐月水量平衡模型和水资源利用综合评价模型研究了我国一些流域的径流和蒸发的可能变化，以及2030年水资源供需差额的变化，作出以下估计：淮河及其以北地区的气候变化对水资源影响很大。各流域水量的增减主要由汛期降水量和蒸发量的增减所决定。黄淮海3个流域水资源短缺的情况可能进一步加剧 。对大气环流模式扬长(预测行星尺度的温度较好)避短(预测局地降水较差)，运用统计学的"结构关系"对华北未来的降水作了预测。建立北京降水量和北半球平均气温的关系时，引入全球CO_2浓度作为辅助变量，它与北半球温度有关，而与其误差无关，可以减小结构关系中的误差。借助这个关系，可以用大气环流模式所预测的未来北半球平均温度推测未来北京的降水量。得到的结果是：如果全球气温上升3℃，华北大部分地方降水将增加15%，太行山东麓可增加30%～40% 。

二、暴雨极值的统计推断

防洪工程依照"设计洪水"及产生此洪水的"设计暴雨"来设计。这里说的暴雨是广义的，指某一时段内相当强的降水，而不是狭义的日雨量达50 mm以上的暴雨。

(一)"设计暴雨"的要素

工程依照其重要性按照主管部门颁布的文件采用一定标准的"设计暴雨"来设计。设计暴雨包含若干要素：

1. 降雨的时段。短时段(从 5 min 到 24 h)的雨量从降水自记记录求得，是桥梁、公路和铁路涵洞和排水沟渠的设计所必须考虑的。水利工程设计则视工程控制面积大小所对应的汇流时间长短而考虑 1 日至数日的雨量。日雨量是基本的气象和水文资料，年代长，站点多。水文计算上所需的设计暴雨常常以日雨量为基础而求得。

2. 暴雨的点雨量。指实测地点的雨量值。

3. 点雨量的时程分配。雨量随时间的变化，加上地形的影响，造成了流量随时间的变化。每场雨雨量随时间的变化不同。一般从历史实例中选取对工程较不利时程分配予以考虑。

4. 暴雨的点面关系。由暴雨中心向外，随着笼罩面积的扩大而雨量减小的规律，称点面关系。令 x 代表面积，r 代表该面积的平均雨量，一般说来，有以下关系：

$$r = a\mathrm{e}^{-bx}, \tag{7.4.1}$$

式中，e 是自然对数的底，a，b 是系数。

求一场雨的点面关系，先绘制该场雨的等雨量线图。从降水中心向外，用求积仪量取相邻两等值线间的面积，求出平均雨量随面积的变化，得到“面积-雨量关系”。水文上习惯称为“面积-雨深关系”，用“面积-雨深曲线”表示。一般从历史实例中选取对工程不利的点面关系予以考虑。

5. “时间-面积-雨深关系”。将一场暴雨或设计时段内的降水分为几段，例如每 6 h 一段。分别求出“面积-雨深关系”，再综合各时段“面积-雨深曲线”随时间的变化，成为曲线族，即“时间-面积-雨深关系”，简称“时-面-深关系”或“时-面-深曲线”。由曲线族可以查出任一面积上的雨量随时间的变化，通过径流系数求出流量随时间的变化。一般从历史实例中选对工程不利的“时—面—深”关系予以考虑。

6. “标准”指的是点暴雨的“重现期”。前面说到设计暴雨的各要素都要从点雨量出发，设计暴雨的“重现期”也指点暴雨的重现期。

工程依其重要性分别采用 5 年一遇至千年一遇的暴雨来设计。以“年”为时间单位的话，“百年一遇”暴雨出现的概率或频率是 1/100，其倒数 100 年就是重现期。重现期为“百年”，具有概率的意义。指在历史的长河中平均一百年出现一次大于或等于这个雨量值，出现在任何时候都是可能的。决不意味着相隔一百年才出现一次，或一百年内必定出现一次。历史资料年代有限，而且有随机性，故某一重现期的暴雨不是由实际历史资料直接求得，而要用数理统计方法处理历史资料加以推断。对降水资料拟合某种概率密度曲线，实质上是对降水资料加以平滑，消除随机性，显出其统计特征。其结果的误差与样本容量大小(资料年数或项数)和拟合的好坏(线型对资料的适合程度)有关。

(二)暴雨极值统计推断的原理

把暴雨量看成随机变量 X，它以不同的概率密度 $f(x)$取不同的数值，$f(x)$称为 x 的概率密度函数，一般为铃形。正态分布曲线就是铃形曲线的一种典型。暴雨量的概率密度曲线一般是左端有限，右端无限而以 x 轴为渐近线的“正偏”的铃形曲线。对暴雨量的实际资料用概率密度曲线(函数)去拟合后，由概率密度曲线就可以计算出某个重现期的暴雨量。

暴雨量的概率密度函数一般可用 3 个统计参数来确定：平均值(一阶原点矩)、标准差(二阶中心矩的平方根)和偏态系数(由三阶中心矩和标准差求得)。有些则还要峰态系数(由四阶中心矩和标准差求得)。

由实际资料拟合概率密度曲线(水文上习称“频率曲线”)，并由它推断一定重现期暴雨量

的整个过程，简称“频率计算”或“频率分析”。其步骤如下：第一，根据经验选取适当形式的的频率曲线。一般以每年一个最大的日雨量组成样本，计算频率曲线所需的参数的值。第二，利用参数按所选的频率曲线计算不同数值 X_P 的累积频率——理论频率 p。将 X_P和对应的 p 点绘在机率格纸上，连成光滑曲线，就是理论频率曲线。第三，对样本每个变量值计算其经验频率。最通用的是由理论推导出的经验频率的数学期望公式：大于等于某一个值 X_P' 的累积概率——经验频率

$$p = m/(N + 1), \tag{7.4.2}$$

式中，m 是样本各值从大到小排列后 X_P'的顺序号，N 是样本容量。将 X_P'及其对应的 p 点到机率格纸上，称经验点据。第四，比较理论曲线和经验点据的拟合情况。如拟合不佳，适当调整参数，使理论曲线尽量与经验点据拟合。这叫“适线”。适线时需要判断经验点据的可靠性，理论曲线的合理性，和由此确定的设计暴雨和应用于工程的可行性等很多问题。这一步需要技术人员的丰富经验。如果曲线和经验点据的分歧是本质性的，不可能通过调整参数来拟合，要考虑改用其他线型。反复适线使频率曲线和经验点据拟合得最好，称“试错线法”。第五，适线成功后，利用此曲线（函数）即可计算出设计标准（某一重现期）对应的暴雨量。

（三）常用的频率曲线

1. 皮尔逊 III 型曲线。皮尔逊曲线族是完全凭经验建立的：按照铃形曲线建立方程式，由 3 个参数决定其形状。但当参数值越出某些临界值时出现了不是铃形的其他曲线。常用的第 III 型曲线是铃形的，富有弹性。参数取不同值时，曲线可广泛拟合很多水文、气象资料，包括暴雨资料。

2. 极值分布。从随机变量的原始分布推导出其极值的概率分布函数及相应的概率密度函数（即频率曲线）。尽管原始分布多种多样，其极值的分布不外乎三型。其中第 I 型极值分布又称双指数分布或耿贝尔分布。原始分布属于指数型的，如正态分布，皮尔逊 III 型曲线等的随机变量的极大值的分布属于此型。有两个参数，用样本通过矩法或最小二乘法求得。

（四）对极值的统计推断的评述

1. 统计推断（频率计算）是许多国家推求暴雨极值的主要途径，其长处有：第一，能拟合许多实际暴雨和洪水资料，意味着暴雨可以看为随机变量并服从一定的概率分布，可以用统计方法推求极值。近百年来，计算结果在工程上的应用大多数经得起实践检验；第二，能推求不同频率（重现期）的极值，适于不同标准的水利工程设计的需要；第三，计算过程具有数学的严密性和客观性；第四，利用仅有的年代不长的资料，要推断长期的极值，还没有其他途径可以完全代替这种方法。

2. 统计推断的有些问题是数理统计学本身所固有的，有些则可随着研究的深入而改善。第一，概率统计方法除了对总体和样本有一定要求外，不深究研究对象的物理本质，不能从物理上证明推断结果的合理性。推断结果出了问题也不能找出物理原因并对方法作出改进。第二，实际资料未必能满足数理统计方法所要求的条件。例如，样本中各个体应来自同一总体。气旋和台风造成的暴雨能否认为是来自同一总体呢？再如，许多统计检验要求总体是正态分布，暴雨资料往往不能满足。实际条件若不符合理论上的要求，对计算结果有多大影响很难加以估计。第三，数理统计方法的本质决定了推断结果是随机的。百年一遇的暴雨在 100 年内的危机率有 63.4%，在 200 年内的危机率达 86.6%。第四，推断结果带有随机性。样本越小，随机误差越大。用既往的几十年资料去推断今后数百年以至千年的稀有现象，依据嫌少。如 1954 年

江淮流域的大水，就当时掌握的资料，认定是百年一遇的暴雨洪水。但时隔44年，在1998年又发生规模接近的暴雨洪水。按今日的资料，既可以认为这样的暴雨的重现期远远短于100年，也可以认为它仍属百年一遇的暴雨，因为百年一遇的暴雨在一百年内出现两次的概率也有18.5%呢！

3. 频率计算过程虽然是客观的，但有几个步骤离不开经验。如线型的选择，参数的调整，洪水痕迹的分析和利用，和对几种方法不同结果的综合判断。固然，有统计手段可以检验线型和参数的拟合优度，但不是单凭拟合优度就能确定线型的，还需加入主观判断。洪水痕迹无疑是宝贵的"实际"资料，但它反映的洪水的重现期多长却要由人去推测。主观判断可以改善结果，也可以造成错误，决定于技术人员的经验和科学精神。

4. 频率计算的误差。频率计算在数学上是严密的。也正是严密的数学，能给出其误差，包括：第一，原始数据的误差，也就是数据是否具有足够的准确性（观测的系统误差，粗大误差和随机误差）、代表性（空间内插的误差，即点雨量对面雨量的代表性）和比较性。第二，方法误差（线型对暴雨特性符合的程度，参数的样本值对总体值的抽样误差等）。方法越复杂，误差越大。第三，运算误差。两个大的数本身只要有一点小的相对误差，两个数的运算结果的绝对误差就很大。原始数据的误差会随着运算而放大。假定原始数据的误差是5%，解出三元一次方程式的根的误差可以达10%，四元一次方程式的解的误差可达30%。求解多元回归进行矩阵运算时，如某两行或两列对应元素数量接近，即谓矩阵是病态的，运算就会产生很大误差 。在总误差中，起主要作用的是数量级大的变量的误差。应着力减小那些严重的误差，才能有效减小总误差。

5. 关于线型的问题。既要求曲线的性质符合研究的变量的特点，又要照顾到拟合的优良。例如，暴雨的最小值是零，最大值无限。按这特点，左端以原点为起点，右端无限的线型，如皮尔逊III型曲线应最合适。但如果与经验点据拟合得不好，也无法使用。另一方面，在经验点据的数值区间内可能拟合得很好，但曲线的数学性质和暴雨资料的特点不符，则不能保证外延曲线得到合理的结果。这两个要求不是常常都能同时满足的。曲线的数学性质是专业工作者感兴趣的。如皮尔逊曲线族的强大适应性使其广为应用。有一种"指数Γ分布"，有4个参数反映变量分布的位置、形状、比例和变换。调整各参数可以得出10种分布，包括皮尔逊III型曲线，克利茨基-闽凯里曲线，对数正态曲线和耿贝尔曲线等。对240个水文站洪水资料的拟合，比皮尔逊III型曲线好 。对各地年最大洪峰流量的72个样本，用皮尔逊III型和V型曲线，对数皮尔逊III型曲线，对数正态曲线，耿贝尔曲线和克利茨基-闽凯里曲线分别拟合和加以对比，发现大部分站点以皮尔逊III型曲线拟合得最好。参数多的线型往往比参数少的线型对经验点据拟合得好。但是，参数越多，用到样本矩的阶数越高，参数的误差越大，推算的暴雨极值的误差也越大。

第五节 可能最大降水

一、推算可能最大降水的原理

重要的水利工程，要求万无一失，要能控制未来可能发生的特大洪水。传统上，按照千年一遇或万年一遇的暴雨和相应洪水来设计已是到了极限。但从频率计算求得的特大暴雨有其缺

陷。第一,"万年一遇"是否就代表极限暴雨了呢?第二,从小样本推断长重现期的暴雨,理论上证明它的误差较大,有时甚至于使推断值失去意义。第三,不能从物理上证明万年一遇的暴雨是可能发生的。科学先进的国家在 20 世纪 30 年代就开始研究从物理途径推求"可能最大降水",简称 PMP(Probable Maximum Precipitation),并由它演算出"可能最大洪水"PMF(Probable Maximum Flood)。PMP 的定义是:"一定历时内理论上的最大降水量。这种降水量对于特定流域在一年的某一时期是可能发生的"。我国水利部 1978 年颁发的规范规定:"失事后对下游造成较大灾害的大型水库,重要的中型水库及特别重要的小型水库的大坝,当采用土石坝时,应以可能最大洪水作为非常运用的洪水标准"。

推算 PMP 的主流方法,是对设计流域的暴雨作天气气候分析。选择一场或几场最严重的典型暴雨为原型,对形成暴雨的物理因子在数值上予以放大,求出在物理上可能发生的最大降水。这叫物理因子放大,或当地暴雨放大。此外,还有暴雨移置(把邻域的特大暴雨"移"到当地),暴雨组合(将几场暴雨连接成连续暴雨),暴雨模型放大(对暴雨的数学-物理模式的参数放大)等。尽管这类方法意图完全通过物理途径推求极限暴雨,但在目前科学发展的水平下,有时仍"被逼"要掺入(而不是有机结合)主观的意见和统计的推断。

当地暴雨放大的步骤是:从历史上选出几场最大的"典型暴雨"进行分析。一般以日雨量为基本对象。如果流域很大,要把暴雨时段扩大到 3 天或更长。若典型暴雨已是高效的,即上升气流已够强,只要进行水汽放大;否则要进行水汽-效率放大。然后调整雨型(等雨量线分布)和作出时间-面积-雨深曲线。

二、大气可降水及其极大化

提供给暴雨的水分是雨区及其上游(水汽入流方向)整个大气柱中的水汽,即地面以上整个气柱的水分质量。这个质量称为大气可降水,简称可降水。实际上利用探空资料将水汽从地面积分(累加)到 200 hPa 高度即已包含大气柱的绝大多数水分,可以作为可降水。

暴雨时整个大气柱的水汽是饱和的,而且空气垂直混合充分,使层结(温度的垂直分布)处于饱和绝热的状态。所以,大暴雨时,大气柱的温度的垂直分布为湿绝热直减率,此时湿度随高度(或气压)的分布规律是已知的。在这种情况下,由地面的露点温度(此时等于干球温度)即可唯一地决定可降水。为了反映典型暴雨的可降水,需要选择一个"代表性露点",经验认为在雨区上游选取最大的连续 12 h 的露点为合适。

可降水的多少与当地海拔高度有关。海拔越高,其上的大气柱越短,可降水越少。这一特点已经反映在地面的露点上。所以,代表性露点应选地面的露点。

计算 PMP 时,要把可降水极大化。气团中的露点是有其物理上限的。产生暴雨的暖气团来自海洋。只当气团底层的温度低于海面温度时,海面才有热量和水汽进入气团中。当气团底层温度升高到和海温相等,海面不再把热量和水分输给空气,气团的露点不再增高。所以,暖气团源地的海面温度是暖气团底层露点温度的上限。海洋温度的变化很缓慢,而且变化有限。从现有的海温资料已能确定暖气团的露点上限。我国产生暴雨的暖气团来自太平洋或印度洋。气团在源地时底部气温比海温至少低 1 ℃。海洋气团登陆后,被山地抬升或因气流辐合而降水,水分渐渐减少。

我国多数暴雨的代表性露点在 23~26 ℃之间。几场"著名的"大暴雨,如"75.8"河南特大暴雨等,露点在 24~26 ℃间。较大的 100 场大暴雨的可降水在 64~68 mm。以上数据供可降

水的极大化时参考。

三、当地暴雨放大

(一)基本公式

暴雨形成的两个主要物理因素是强烈而持久的空气上升运动和连续供应丰沛的水汽。将这两个因素放到最大,就得到 PMP。对水汽的放大,应用最广泛的是基于大气水分平衡的方法。

把研究的流域概化成顺着盛行气流方向的一个矩形,沿着气流方向的长度为 Y,宽度为 X。流域上的气柱为一立方体。在短于 3 天的时段内,地面蒸发量可忽略不计,流入流域的水汽和流出流域的水汽之差便是降水量。空气入流的平均速度是 V_i,入流的可降水是 W_i;出流的速度是 V_o,可降水是 W_o。$V_iW_i-V_oW_o$ 就是单位时间入流水量和出流水量之差,即降水量。考虑入流边界上一个单位的宽度,则单位时间内落到单位面积地面上的降水量,即降水强度是

$$I = (V_iW_i - V_oW_o)/Y。 \tag{7.5.1}$$

引入"辐合因子"β 和"效率"η,使

$$I = \beta V_iW_i = \eta W_i, \tag{7.5.2}$$

其中 $\beta=I/V_iW_i$,即单位时间的降水量 I(即降水强度)占单位时间入流水量 V_iW_i(又称为"入流指标")的份额,反映把入流水量变成降水的气流辐合的强度。$\eta=I/W_i$,即降水强度占入流可降水的份额,又称"雨湿比",代表上升气流把可降水变成实际降水的效率。

时段为 t 的典型暴雨(各参数加下标 d)的降水量

$$P_d = I_dt = \eta_dW_dt = \beta_dV_dW_dt, \tag{7.5.3}$$

将各因子极大化(各参数加下标 m)得 PMP

$$P_m = \eta_mW_mt = \beta_mV_mW_mt. \tag{7.5.4}$$

两式相比,有

$$P_m = (\eta_mW_m/\eta_dW_d)P_d = (\beta_mV_mW_m/\beta_dV_dW_d)P_d \tag{7.5.5}$$

这是当地暴雨放大的基本公式。带下标 d 的参数是历史上典型暴雨的值。把带下标 m 的参数极大化,便得到 PMP。

上述公式的应用,视情况分为单纯的水汽放大和水汽-效率联合放大两类方法。此外,还可利用天气系统简单的模型进行放大。

(二)水汽放大

1. 可降水放大

分析我国 130 多场大暴雨,可知高效暴雨的日雨量与可降水有良好的线性相关。因此,典型暴雨如属高效暴雨,只要放大水汽(可降水)。

历史上的一场暴雨符合下列条件之一者即可判定为高效暴雨;第一,暴雨量很大但是可降水不很大;第二,突出地超过当地长期历史资料中的各场暴雨;第三,当地无长期资料,但某一场暴雨突出地超过邻近地方长期资料中的许多暴雨,或和邻近形成暴雨条件更好的地方的暴雨比较,也不逊色的;第四,和全国各地特大日雨量纪录比较不算小的。

确定是高效暴雨后,可参照前述原理放大可降水。从已有的工作成果看到,极大化的可降水一般相当于典型暴雨可降水的1.1至 1.5 倍。

2. 入流指标放大

如果暴雨历时较长，它的形成和维持不仅仅依赖于静态的可降水，还看水汽输入的强度和持续时间。这类暴雨，应对入流指标(即入流风速和入流可降水的乘积)$ViWi$ 进行放大。一般的做法是分别放大入流风速和可降水，再取其乘积。可降水的极大化方法已于前述。入流风速取上游从地面至 6 000 m 高度的合成风速(向量平均)，已能代表输送 90%的可降水的风。简单的做法，则是直接取有代表性的高度的风速代替合成风：海拔低的地方取 850 hPa 高度的，海拔高的地方取 700 hPa 的。极大化是取历史上降雨天气下的最大值。有人求取 50 年一遇的值。这个重现期相当于我国大多数台站的历史资料的长度。理论上，将比湿乘以风速代表水汽通量，再沿流域边界和大气厚度积分代表净输送量，更能代表形成暴雨的水分输送，但这样做比较复杂。水汽净输送量各组成分量的误差的量级不同，应分析各项误差量级而定取舍，以简化工作而保证精度。

已有的工作表明，极大化的水汽净输送量相当于实际大暴雨的水汽净输送量的 1.16 至 1.34 倍。

目前有些做法还有待改进。首先，入流风速和可降水不是两个独立的随机变量，两量的乘积的极大化不等于两量的极大化的乘积，后者有偏大的倾向。其次，代表性高度有待进一步研究。再次，取历史最大值或一定重现期的值的根据还不充分。

(三)水汽-效率联合放大

1. 水汽-效率放大

如果设计流域历史上无高效暴雨，则要将效率和水汽同时放大。最大可能的上升速度目前只能凭经验推测。一个办法是以本流域或气候相似邻近流域历史上已有的大暴雨的效率作为极大化的效率；另一个办法是从历史洪水痕迹估计洪峰流量，反推暴雨量，再换算成效率。我国暴雨效率最高的地区在东南沿海，太行山东侧和黄土高原。其次为四川盆地。暴雨的最低效率在武夷山和秦岭北侧。

效率随暴雨的面积和历时而改变。小面积和短时段的暴雨可以有很高的效率，大面积和长时段的暴雨不会有很高效率。把当地的效率极大化或移置邻近暴雨的效率时要考虑面积和时段的因素。

我国大暴雨 24 h 降水量的效率，台风的在 0.52～0.68 之间，非台风的在 0.51～0.53。如果比这个效率小，应该放大。

2. 水汽辐合指标放大

从基本公式可以导出

$$P_m = \eta_m W_m P_d / \eta_d W_d, \qquad (7.5.6)$$

式中，可降水可以用从地面到 200 hPa 高度的代表性比湿，即这两个高度的比湿的差值 ΔQ 表示。效率可用气流辐合指标，即代表性高度上东西向风速差和南北向风速差的代数和($\Delta U+\Delta V$)。这样

$$P_m = (\Delta U + \Delta V)_m \Delta Q_m P_d / (\Delta U + \Delta V)_d \Delta Q_d. \qquad (7.5.7)$$

研究表明，辐合指标和 24 h 降水量有良好的对应关系。

3. 凝结速率放大

单位面积上的降水强度等于其上气柱的水汽凝结强度。凝结强度是气流平均上升速度 ω 和凝结函数 F(单位时间内气流上升单位距离水汽的凝结量)的乘积在气柱内的的积分值。实际上简化，对 ω 代之以它的气柱内平均值 Ω；对 F 代之以它对气柱的积分值 Φ，即凝结率。于

是时段 t 内的降水量

$$P = -\Omega\Phi t, \tag{7.5.8}$$

在饱和绝热的条件下，Φ 只由地面代表性露点决定。气流上升速度很难从天气资料计算，一般从以上公式由其他两个量反算出。

PMP 的量加下标 m，典型暴雨的量加下标 d，则

$$P_m = \Omega_m\Phi_m P_d/\Omega_d\Phi_d, \tag{7.5.9}$$

P_d 是典型暴雨量实测值，Φ_d 由地面代表性露点查出，由公式反算出 Ω_d，Φ_M 由极大化露点决定，Ω_M 从历史上几场大暴雨反算出来的值中选取。

（三）天气系统模型

1. 台风模型

台风的等压线大体上是同心圆。从外面进入半径为 R_1 的外圈等压线的水汽通量为 $2\pi R_1V_1W_1$。V 是向心风速，W 是可降水。进到半径为 R_2 的内圈等压线的水汽通量为 $2\pi R_2V_2W_2$。两个水汽通量之差为净通量，等于由辐合造成的降水量。它展布在两等压线间的圆环内。单位面积和单位时间的降水强度

$$I = 2(R_1V_1W_1 - R_2V_2W_2)/(R_1^2 - R_2^2), \tag{7.5.10}$$

V 可以从等压线梯度测算。如果 R_1，R_2 相差不大，代表性露点接近，可降水接近相等，上式更可简化。

台风过程的地形雨，可从地图上求出沿风向的地形坡度，按地形雨的方法计算。

先对实际发生的典型台风求出台风半径、高度、风速、历时和露点温度等参数，再将各参数极大化，从模型求出 PMP。

2. 梅雨模型

梅雨主要是静止锋降水，也有气旋波降水。计算此类降水要解决比湿 q 和上升速度随高度变化的问题。前者比较简单，可以按饱和绝热率。至于气流的上升速度 ω，气旋波尚无合适解决办法。静止锋则可以从锋面坡度计算。如果静止锋是稳定层结，其上升速度和降水可用稳定层结下地形降水模式计算。有了 q 和 ω，按降水强度公式

$$I = (1/g)\int_a^b(\partial q/\partial p)\mathrm{d}p, \tag{7.5.11}$$

计算，式中，g 是重力加速度，p 是气压，积分从地面（$p=a$）到大气上界（$p=b$），实际上到 200 hPa。

水汽的极大化已于前述。上升速度的极大化取历史上多场大暴雨的最大值。

四、邻域暴雨移置和降水过程组合

（一）邻域暴雨移置

1. 移置的原则

如果设计流域未出现过特大暴雨，可考虑将地理和气候一致的地区的高效暴雨移置到设计流域来。可否移置，只有凭定性的概念和经验：第一，暴雨往往是天气系统和地形结合造成的。可否移置主要看天气系统。天气系统的一致区较大，地形也须一致才能移置；第二，山脉往往是一致区的界限。不应跨越山脉移置，可以沿高大山脉的山脊方向移置；第三，宜移置较长历时的暴雨，不宜移置较短历时的暴雨，因后者的局地性很强；第四，主要是移置效率。可降水则

利用当地的代表性露点放大。移置后雨型(等雨量线的分布)要作些调整。

2. 移置的步骤

(1)对拟移置的暴雨(以下称典型暴雨)进行天气气候分析,包括环流形势,天气系统配置,降雨系统的结构、演变、移动,水汽来源及输送,大气稳定度,地形对降雨的作用等。主要搞清这场暴雨异乎寻常的天气原因和地理原因。

(2)对设计流域历次暴雨的成因进行分析和统计。主要搞清当地有无出现典型暴雨的条件。如果回答是肯定的,那么,典型暴雨在本地出现时天气系统结构、水汽来源等会有甚么变化?暴雨会加强或减弱?

(3)移置后水汽的调整。设计流域可降水极大化后与典型暴雨的可降水作对比,进行水汽调整。雨型调整:雨轴和雨区要符合自然的降水分布。如切变线的雨轴与切变线走向一致。地形雨则往往分布在山脉一侧。一般将暴雨的中心移放在设计流域中心,或对工程最不利的地方,做最严重的准备。地形雨的调整以下讲述。

3. 地形雨的调整

(1)按气候概念调整:典型暴雨在 A 地区,总雨量 P_A 可以看成是由天气系统产生的雨(俗称"辐合雨")P_{AC}和地形雨 P_{AT}组成,即

$$P_A = P_{AC} + P_{AT}. \tag{7.5.12}$$

设计流域 B 地区也有同样关系。一般认为,相邻两地辐合雨基本相同,只能移置辐合雨,即令 $P_{BC}=P_{AC}$,有

$$P_B = P_{AC} + P_{BT}. \tag{7.5.13}$$

由前两式有

$$P_B - P_{BT} = P_A - P_{AT}. \tag{7.5.14}$$

或

$$P_B = P_A + [(P_{BT} - P_{AT})/P_A]P_A。 \tag{7.5.15}$$

应当注意的是,地形雨不是个常数,而与总雨量成比例。上式方括号内的值,代表一次暴雨时两地地形雨的差异(以占 A 地总雨量 P_A 的百分率表示)。典型暴雨的地形雨可取雨季的平均值。把雨季两地总雨量的差($P_{BR}-P_{AR}$)占 A 地总雨量 P_{AR}的百分比,取代上式方括号内的值,得到设计流域 B 相应于 A 地典型暴雨的雨量为

$$\begin{aligned} P_B &= P_A + [(P_{BR} - P_{AR})/P_{AR}]P_{AR} \\ &= P_A P_{BR}/P_{AR} \end{aligned} \tag{7.5.16}$$

这证明了移置暴雨的地形雨调整只要乘上两地雨季总雨量的比值。

(2) 稳定层结下地形雨的动力学模式

假定实际雨 P 是辐合雨 P_C 和地形雨 P_T 之和。把凝结函数 F 和地形造成的上升速度 ω 的乘积作为积分函数,对高度(用气压 p 表示)和降雨时段 t 积分,得到辐合雨。凝结函数随高度的变化,和地形强迫造成的近地面上升速度 ω_0 在稳定层结下随着高度的变化均可由动力气象原理求得。在湿绝热、静力平衡和地转近似的条件下,地形雨为

$$P_T = (t/g)F\omega_0\Delta p[0.5 + 1/(e^{\mu\Delta p} - 1)], \tag{7.5.17}$$

其中,t 是降水历时,g 是重力加速度,F 是凝结函数,Δp 是一薄层空气的气压差,e 是自然对数的底。参数 μ 是地形起伏主要波长、重力加速度、层结稳定度、静力稳定度参数和地转参数的函数。地形抬升气流的上升速度

$$\omega_0 = -\rho g V_n \nabla H, \quad (7.5.18)$$

ρ 是空气密度，V_n 是风在坡向上的分速，∇H 是地形的高度梯度。

4. 移置可能性分析的实例

“75.8”暴雨是我国正式记录到的 1 日和 3 日最大暴雨。暴雨中心河南林庄最大 24 h 雨量达 1 060 mm。可否把这场暴雨移置到湖南省？换句话说，湖南会不会出现这样大的暴雨？曾作了移置到湖南的可能性分析。“75.8”暴雨是台风暴雨。台风在东南沿海登陆后，向西北移动，受高压坝阻挡，到达河南后，速度减慢，甚至停滞。有冷空气在下层进入，上层有东风波，加强了上升运动。有水汽从东南方源源输来，维持了强大的暴雨集中在一定地区。将湖南和河南的地理环境和“75.8”暴雨的天气气候背景对比，如表 7.5.1。

通过对比，估计类似“75.8”暴雨可在湖南某种地形下发生。在东部的可能性最大，可能性向西递减。

表 7.5.1　“75.8”暴雨条件对比

比较项目	河南 75.8	湖　南
暴雨成因	台风中心进入	历史上常有台风中心进入
台风中心停留时间	20 多小时	常有 30 小时，个别 50 小时
环流形势	高压坝阻挡台风前进	历史常有
下层	冷空气进入	有历史先例
上层	东风波叠加	有历史先例
台风强度变化	平稳后加深	有类似变化
中小尺度系统	天气尺度系统内有中小尺度系统加强暴雨	未作具体分析。理论上属正常
水汽供应	源源不断。700 hPa 比湿达 16×10^{-3}	历史有。700 hPa 比湿达 $16\times10^{-3}\sim17\times10^{-3}$
地形作用	暴雨区在伏牛山迎风东麓。中心在迎风喇叭口地形	有抬升气流地形

(二)降水过程组合

如果水利枢纽要控制的面积很大，汇流区内的降水要经很长时间，如 3 天，5 天或更长时间才能全部汇集到枢纽处，就要计算那个时段的 PMP。

长时段内可能包含不止一个降水过程(或天气系统，下同)。若未来有可能出现某几个降水过程的组合，造成很严重的降水，就要考虑将几个过程串联起来，求算 PMP，又称为“暴雨组合”。串联的降水过程不限于本流域的，也包含了邻域可移置的过程。移置的原则已于前节讨论，这里只谈降水天气过程组合的原则。

组合的可能性要靠天气的经验来判断，主要考虑几个过程衔接出现的可能性。假设历史上的暴雨天气过程是冷锋-气旋波。冷锋造成暴雨，气旋波移出本流域后降水减小，暴雨总量不很大。从天气学经验可知，冷锋若变成静止锋滞留当地，或再演变成气旋而移动缓慢，会使暴雨持续，造成更严重的威胁。对此，可考虑将历史上的冷锋过程，静止锋过程以至气旋波过程组合起来，推算 PMP。降水过程不仅可以向后组合，只要天气学上合理，也可以向前组合或在中间插入。

过程组合的经验总结 成以下“相似原则”：第一，几个过程的大尺度环流形势须相似；第二，降水天气系统的尺度须相同；第三，雨型须接近；第四，须在同一天气气候季节。这些都是必要条件。至于充分条件则不具体，全凭经验，没有客观定量的判据。

过程组合与当地暴雨放大的思路(从物理因子作定量、客观推算)大相径庭。是一种主观的、经验性的做法。从概率论的基本定理可知，几个独立事件同时出现的概率，等于各事件出现概率的乘积。假设某次冷锋暴雨，某次静止锋暴雨和某次气旋暴雨本身的重现期都是 5 年一遇，不算严重。三者同时出现的重现期就是125 年一遇，非常严重了。人们没有 100 年以上的经验，要判断这事件是否会发生，是很困难的。

五、推算结果检查

(一)检查的步骤

估算 PMP 的方法多种多样，其参数的极大化并非完全客观。这样，估算出来的 PMP 不是唯一的，这是受科学水平和工作人员水平所限。为了避免推算结果存在明显的错误，应对结果从以下几方面作检查：

1. 历史资料的包含

设计流域有纪录的所有高效暴雨和历史洪水调查资料是否都已包含在分析的内容中。

2. 几种方法相互比较

不同方法有不同的特点。在一定的资料条件下和天气气候背景下，某种方法可以显现出其长处，而另一种方法则可能无法施展其特长。比如，历史资料太短则不宜用频率分析方法；地形复杂则不宜移置暴雨。当各法结果不同时，应着重考虑运用条件较好，因而比较可靠的方法的结论，不能简单地将几种方法的推算结果平均。

3. 与天气气候及地理环境相近地区的 PMP 比较。

(二)我国的特大暴雨

与同纬度其他地区相比，我国(包括干旱、半干旱地区)历时从 0.5 h～72 h 的最大雨量是较大的，有些接近或成为世界纪录。出现大范围大暴雨的年份(及地域)有：1930(辽西)，1931(长江、淮河流域)，1932(松花江流域)1933(黄河流域)，1935(长江、汉江流域)，1939(海河流域)，1954(长江、淮河流域)，1963(海河流域)，1975(河南)，1998(长江流域，松花江流域)。

为了对研究流域暴雨的概貌有个了解，也为了考虑移置暴雨，应分析、统计暴雨的成因并视需要根据暴雨时空分布特点进行暴雨区划。

下面是我国暴雨分布的概貌。了解这个概况，在作暴雨分析时心中有数。

(1)24 h PMP 等值线的分布特点是：小于 100 mm(以下单位相同，从略)的低值区在西藏和新疆地区。大于 1 900 的高值区在台湾。大陆东部一般在 500 以上，沿海及邻近的几个闻名的暴雨中心在 800～1 000。这些 PMP 值略大于该地区实测和调查的最高记录。

(2)实测和调查的一日(或 24h)最大记录如下：黄土高原北部，实测的一般为 200，个别为 400，而调查的一般为 400～600，个别达1 400。气象记录最长的上海市，一日最大雨量只有 246.7。而在不远的郊县塘桥，测得一日最大为 581.2。河南中西部 1975 年以前一日最大雨量 586，但“75.8 暴雨”达 1 060.3。黄河河套是半干旱地区，一日最大雨量为 200，但调查“77.8 暴雨”，在一个叫做木多才当的地方有 1 400 的痕迹。板桥水库在 1975 年前一日最大雨量均值为 126，变差系数为 0.43，百年一遇为 307。加入特大的“75.8 暴雨”的纪录后，均值为 140，变差系

数为 0.60,百年一遇为 447。实测和调查一日最大雨量的分布特点是:总体上南北差异小,东西差异大。这和气团活动的地理特点及大气可降水的极值的分布有关。东半部南北差异表现在从南到北各地的年降水量和最大日雨量纪录。年降水量从南方约 2 000 mm 到北方不到 600 mm,最大值相当于最小值的 3 倍以上。最大日雨量海南天池 962.2 mm,福建高山 737.6 mm,河北獐幺 951.5 mm,辽宁黑沟 657.9 mm。最大值只相当于最小值的 1.5 倍。原因是南方终年受海洋气团影响,不仅带来了丰沛的水分,而且全年有活跃的降水天气系统,年降水量很大,最大日雨量也较大。北方只有夏天才受海洋气团的影响,夏季的最大日雨量可以较大,但全年降水量不多。至于最大日雨量的东西差异,似乎在 103°E 有一突变。其东,即使是半干旱的内蒙古、陕西和宁夏,最大日雨量仍达 400 mm 以上。其西,新疆的哈拉伊敏只有 122 mm。这是因为西部海拔较高,大气柱短,可降水少;在西风带下,源于我国东南方的海洋气团不能到达,大气中水分少,而且没有热带的强烈降水系统。不过,有个别纪录十分突出,像前面提到过的木多才当的纪录,是经过核实的,不过未能从造成暴雨的天气系统的结构得到解释。另一个特点是迎风坡往往有较大值。

(3)1 h 最大雨量的分布。大形势和 1 日最大雨量相似。东半部南北差异小,而是由东向西递减。干旱、半干旱地区虽水分不丰,但 1 h 最大雨量并不特别小,说明局地强对流也可造成短时暴雨。迎风坡未见特大值。

第八章 旅游、商业与气候

旅游是一项综合审美活动，是对自然美、人文美、艺术美和生活美的欣赏和享受，若在风和日丽的天气，将会使人心旷神怡，增加几分美感和乐趣。

自然风光可以开阔眼界、增长知识、促进人们心身健康。现代社会的生产方式，电子化、机械化程度越来越高，同时城市现代化的建筑、交通拥挤、人口众多、环境污染和噪音污染严重，因此，人们往往到空气新鲜，自然风光优美的山水地区去陶冶性情，恢复工作兴趣和热情。各地气候差异很大，选择合适的旅游时间和地点，首先考虑的就是气候。由于旅游的目的不同，选择的时间也就各异，虽然有些自然风光一年四季都可赏悦，但对一些特殊风光，必须在特定的气候条件下才能领略。如“风吹草低见牛羊”必须在夏末初秋，“千里冰封，万里雪飘”只能在隆冬，“海市蜃楼”春、夏季最合适，“抱着火炉吃西瓜”也只能在深秋和冬季。“人间四月芳菲尽，山寺桃花始盛开”或“洛阳城里花如雪，陆浑山中今始发”这种气候垂直变化的景象在春末、夏初表现得最突出。观看树挂(雾凇)无疑应是在冬季，等等。

游览名胜古迹可以激起人们去旅游的心理原因，常常是兴趣，猎奇，求知，向往等。虽游览古迹与气候关系不甚密切，但着衣、行装也必须考虑气候。

体育比赛或盛会与气候也很密切，如选择登泰山比赛、冰灯节、风筝节、牡丹节、桃花节等与气候的关系都是很强的。综上所述，可见无论那种旅游活动都受到天气气候的影响。

旅游已是当今人们非常关注的一项活动。据世界旅游组织分析，旅游人数到2010年全世界将达到10亿多，到2020年将增至16亿。可见旅游事业在不断地蓬勃发展。

第一节 旅游与气候

一、大自然旅游与气候

大自然风光和古迹旅游气候季节性很强，若能选择最佳旅游的时间，也就是选择最好的天气条件将起到修饰和润色的作用。

(一)冬季旅游

我国属季风气候，冬季在蒙古高原的控制下，每每冷空气南下，常使我国大部分地区寒冷而干燥，成为世界同纬度带冬季最冷的国家。1月份平均气温，我国东北地区比世界同纬度地带平均偏低14～20 ℃，黄河流域偏低10～14 ℃，长江以南地区偏低8～10 ℃，南岭以南偏低5 ℃左右。

1月份东北最北部平均气温冷到－30 ℃以下，漠河－30.9 ℃，由此向南气温递增，到松辽平原已增到－20～ －15 ℃，－10 ℃等温线基本与纬度40°N平行；0 ℃等温线基本与秦岭淮河一线平行；10 ℃线基本平行南岭；15 ℃线分布在雷州半岛以南和台湾南部。20 ℃线在海南南部，崖县为20.5 ℃，西沙群岛为22.7 ℃，南沙群岛南部可达25～26 ℃；冬季等温线与纬度

基本平行，南北温差在 50 ℃以上。北国是冰冻寒天，南国仍是鸟语花香的宜人季节。冬季全国干旱少雨（除长江中游和台湾等地外），降水都在 50 mm 以下，最多在台湾东北部可达 150 mm，秦岭淮河线以北均在 10 mm 以下。所以冬季旅游要欣赏冰、雪就向北，要避寒就向南。

关于四季的划分：以 3～5 月为春，6～8 月为夏，9～11 月为秋，12～2 月为冬。这不完全适合幅员辽阔的我国气候。故张宝堃根据我国实际情况提出，以候（5 d）平均气温为标准，低于 10 ℃为冬季，高于 22 ℃为夏季，在 10～22 ℃之间为春、秋季。这样我国就有无夏、无冬和四季分明地区。

1. 晶莹冰灯

哈尔滨 10 月入冬，直至次年 4 月，冬季长达半年。其间，白雪青松，银装点翠，清静无尘，玉洁冰清。每年 1、2 月份是气温最低时期，平均气温在－15 ℃以下，终日结冰不化。在严寒的气候条件下，艺术家们创造了独特的“冰雕”，其形状奇特美妙，栩栩如生。哈尔滨的冬天，夜幕垂挂得特别早，黄昏时分，万灯齐明，各种冰雕光亮透明，宛若绚丽的水晶世界。这里每年元月份都举办冰雪节，有丰富多彩的以冰雪为内容的活动，有冰雪画廊，雪塑比赛，国际冰雕比赛，冰球比赛，冰雪冬令营，滑雪、滑冰等。

2. 树挂奇景

树挂就是雾凇，是过冷却雾滴冻结或水汽凝华挂在电线上、树木树叶上、物体凸出部分的角和边上松脆的冰晶。它是松花江沿岸冬季的奇景。每年从 10 月到次年 4 月，沿江两岸的树枝上挂满了白色的晶状附着物，因树冠不同而形状各异，仿佛银柳闪烁，玉菊怒放，满树梨花，又宛如南海的白珊瑚。这白色的附着物叫雾凇。松花江沿岸的哈尔滨、吉林在冬季都有出现，以哈尔滨的雾凇出现持续时间最长，可达 104 h，吉林出现次数最多。冬季，通过丰满电站大坝的江水是来自松花湖冰层下高于冰点的湖水，因此，从丰满电站到吉林这段江面在冬季仍不结冰，在－30 ℃左右的气温下，水面不断蒸发水汽。吉林是一个化工、冶金工业城市，空气中含有大量烟尘杂质，为过饱和水汽提供大量凝结核，因而这里雾多且浓。吉林市沿江又是绿化带，有一排排树木，过冷雾滴很快在树枝上凝成树挂，厚度可达 40～50 mm，每年从 10 月开始到次年 4 月结束，平均每年出现 30 d 以上，最多一冬可出现 60 d 以上，以 1、2 月份出现最多，尤其冬至以后，几乎天天可见，每天从傍晚开始出现直到第二天午后，随气温升高而脱落，持续时间约 20 h 左右。

雾凇在我国西南和长江下游也有出现，特别是出现在高原和山地，由于冬季登山不便，所以松花江树挂名冠海内外。

3. 北国雪景

“千里冰封，万里雪飘，望长城内外，惟余莽莽”。在雪天游长城的人。看到长城像巨龙蜿蜒曲折山脊的雄伟壮观的景象，对毛泽东在《沁园春 · 雪》中所抒发的豪情与胸怀会有更深的感受。

东段长城大致 12 月上中旬降雪，3 月上旬终雪，历时 100 d，长城西部开始降雪早，终雪晚。最大积雪深度 20～30 cm 间。华北平原最大积雪深度小于长城沿线，这是由于冷空气经燕山和太行山山脉，气流抬升致雨，华北平原处于背风面下沉气流而少雨雪。所以在华北燕山山脉相对为一较大积雪区。长城东段西部的榆林最大积雪深度为 15 cm，延安为 17 cm，这一带是可观赏雪景的长城，陕西以西的西段长城沿线降雪就很少了，最大积雪深度在10 cm以下，有些年几乎无积雪，长城的最西端的安西、玉门、酒泉等地最大积雪又较大，大约在 15 cm 左右。

从积雪情况来看，长城东西两段，即延安以东和酒泉以西。可惜酒泉到嘉峪关的长城已断续残存，所以要饱览长城雪中的雄姿，只能在延安以东了。八达岭、慕田峪、山海关等雪景极为壮观，此时的长城犹如蛟龙，逶迤在莽莽雪岭之中，登长城使人心旷神怡，浩气凛然。

4. 踏雪寻梅

梅花于冬季开放，凌寒傲雪，我国有以下几处主要的赏梅去处。

南京中山门外梅花山；无锡惠山西南滨湖梅园；神农架，从武汉溯江北上经江陵过宜昌直上西陵峡，沿香溪河北上，到神农架，这里是腊梅的故乡，隆冬时节，几千亩腊梅在瑞雪中怒放；成都梅花自古繁盛，隆冬，草堂内几百株梅树次第开放，冷蕊幽枝，清香四溢；云南冬天，高山峻岭之中，腊梅漫山遍野，簇簇丛丛，倒挂险峰，横插巨石，迎风傲雪，香飘云天；杭州西湖孤山，喻为广寒宫，有梅林，冬季最早开放的是檀香梅，还有红梅，白梅、绿萼梅、朱砂梅，孤山多梅，又名梅花屿，梅花盛开时，芳香馥郁，益神启智，舒胸阔腑。

5. 无冬的南亚热带

冬季北方天寒地冻时，南亚热带 1 月平均气温在 10 ℃以上，仍是百花怒放，一派春色，这一带是避寒旅游的佳地。

(1)闽南金三角，福建省南部，厦门、泉州、漳州称为闽南金三角，属南亚热带气候，无冬季区。四季花香，这里最冷月(2 月)平均气温为 12.6 ℃，平均最低气温 10 ℃左右，极端最低气温 2 ℃以上，气候温暖如春，海滨浴场，冬季仍可游泳嬉水，雨天不多，晴天日数为一年中较多的时节，大风也很少，真是“山无高下皆行水，树不秋冬尽放花”。成为冬季旅游避寒的胜地。

(2)香港，属南亚热带气候，无冬无霜，海洋性气候比较明显，年平均气温 22.4 ℃，1 月平均气温 15.5 ℃，7 月为 27.8 ℃，年降水量 2 200 mm，雨季为 4～9 月，占年降水量的 85%，干季 10～3 月仅占 15%。冬季(12、1、2 月)气候宜人，这里四季常青、繁花似锦到处都是亚热带自然风光。深水湾、浅水湾各有千秋，海洋公园有海豚和杀人鲸的精采表演，会令人流连忘返，晚上，登高观香港夜景，一领东方明珠的光辉。

(3)台北，无冬季，气候暖湿，风多雨沛。属南亚热带气候，四季常绿。台北年平均气温 22.0 ℃，1 月平均气温 15.1 ℃，7 月28.4 ℃，夏长 190 d，秋无终日，春无始日，秋春相连。隆冬的强寒潮，偶尔可造成冻害，夏季遇到台风袭来时也会遭到风和水灾。台北年降水量 2109.9 mm，冬季降水量较少，其他各月降水均丰富。风景区有阳明山，海拔 443 m，群山四合，四季风晴雨雾，冬无严寒，夏无酷暑，是冬、夏旅游胜地。台北有壮观温泉、地热，还有中国历代文物精品的台北故宫博物院。

(4)广州，属南亚热带季风海洋性气候，温暖、多雨、湿润，有花城之誉。年平均气温 21.8 ℃，1 月平均气温 13.3 ℃，7 月28.5 ℃，夏长 195 d，无冬，年降水量 1681.9 mm。到处呈现南亚热带自然景观。冬季气候暖和，宜旅游。四季花香，瑰丽舒心的湖光山色，处处步换景移，美不胜收。

6. 长夏无冬北热带

(1)海口，地处热带，属北热带季风气候区。年平均气温23.8 ℃，1 月平均气温 17.2 ℃，无冬季，7 月 28.4 ℃，夏长 235 d，近 8 个月之久。年降水量 1684.5 mm，5～10 月为雨季，降水量 1350.3 mm，占年降水量的 80%以上，11～4 月为干季，降水量仅占不到 20%。市内遍种椰树，故有“椰城”之美称，椰风海韵，风光迷人，冬无严寒，气候十分宜人，是冬季避寒、旅游、度假、冬泳胜地。

(2)恒春,台湾南端恒春属北热带气候,全年暖热年平均气温 24.8 ℃,月平均气温19.8 ℃,7 月 28.3 ℃,夏季 270 d,9 个月之多,春、秋仅 85 d,无冬。素不凝霜,年降水量 2 207.3 mm,湿季 5～10月降水占全年降水量的 92%以上。干季 11～4 月降水量占 8%,夏雨冬干,干湿季尤为分明。四季热带景观,常绿不凋,每年隆冬朔风袭来,台湾东北部阴雨连绵,而这里仍是万紫千红春意盎然,风和日丽,四季恒春。冬季去恒春旅游,既可避寒,又可观赏热带作物。

(3)西双版纳位于 20°10′～22°40′N,是我国西南边际的一个独特橡胶园,属北热带,北有横断山屏障,东有哀牢山阻挡,冬季北方寒流不易侵入,因此冬无严寒,最冷的 1 月份各地平均气温12～16 ℃,平均最低气温也在 10 ℃以上。每年 11 月到次年 4 月为干季,降水较少,只占全年总雨量的 15%,晴天多,日照时数是湿季的两倍,风小,多数时候为静风。年平均风速仅 0.5m/s,是全国最小的风速区。因此冬季到这儿来旅游是合适的,气候温和,又没有令人烦恼的阴雨。不过,西双版纳的盆地和坝子地区气温日较差特别大,2 月份,早上气温 10～11 ℃,午后就升到 30～31 ℃,气温日较差 10～18 ℃。这里可以看到热带雨林自然景观和被茂密竹林围绕的傣族村寨中精巧洒脱的竹楼,也称“干栏”建筑。还可欣赏到山青翠,天蔚蓝,云海岸边橡胶园的晨景。

7. 四季如夏的中热带

三亚古称崖州,是我国最南端的一座滨海城市,属中热带,依山面海,热带自然风光秀丽。年平均气温 25.5 ℃,1 月平均气温 20.8 ℃,7 月 28.5 ℃,夏长 290 d,春、秋仅 75 d,无冬。在全年 12 个月中极端最高气温均可达到 30 ℃以上。年降水量 1 255mm,5～10月为雨季,降水量为 1151 mm,占年降水量的 92%。雨季与干季交替过渡,雨量突变十分明显。有亚龙湾、大东海、天涯海角、鹿回头等名霏国内外的景区。充足阳光的金色沙滩、清澈的海水、热带植物的绿色、清新的空气、所谓旅游的 5 大要素俱全。亚龙港和大东海的海滨浴场景色迷人,水碧沙白,滩平岸长,未受污染,有“东方夏威夷”称谓。这里已成为冬季避寒、冬泳、度假、旅游的胜地。

(二)夏季旅游

盛夏 7 月除了海岸带和岛屿外全国都是最热的月份。7 月等温线与 1 月基本相反,等温线为南北走向,所以南北温差远较冬季为小,最北漠河为 18.4 ℃,到海南的崖县为 28.5 ℃,西沙 28.7 ℃,南北仅相差 10 ℃左右。比冬季南北差至少 40 ℃左右。

7 月平均气温东北平原 22 ℃左右,华北平原 26～28 ℃,淮河流域 28 ℃以上,两湖盆地 28～30 ℃,如江西的贵溪 30.0 ℃。号称长江流域的“三大火炉”的重庆、武汉和南京分别为 28.0 ℃、28.6 ℃和 27.9 ℃。华南云雨盛行,7 月平均气温也只有 26 ℃左右。由此可见,夏季从松花江到珠江都是游泳的佳季。

我国东部沿海和岛屿,夏季要比内陆凉爽得多。由于海水热容量大,太阳不易晒热,升温缓慢,使海洋夏季显得凉爽。如青岛比济南低 3.6 ℃,成山头比济南低 6.2 ℃,嵊泗比乍浦低 2.4 ℃。所以沿海是夏季避暑的好地方。从内地到海滨,面对广阔蔚蓝的海洋,使人心旷神怡,又有海风送爽,人们感到大自然的伟大。

新疆戈壁沙漠地区,7 月平均气温在 26 ℃以上,吐鲁番盆地高达 33 ℃。7 月平均最高气温达 40 ℃,成为我国最热的地方,因此,有“火洲”之称。青藏高原盛夏 7 月广大地区气温在 10 ℃以下,比东部平原低 18 ℃左右。

夏季是我国雨量特别集中的季节,夏季(6～8 月)的降水量占全年的百分比,北方在 70%以上,南方也在 30%以上。7 月份雨量分布,基本上代表夏季雨的分布形势,我国东部降水量基

本上都在 150 mm 以上，三北北部在 100 mm 以下，降水量最少的在塔里木和柴达木盆地降水量不足 5 mm。所以夏季旅游除三北地区外，雨具是必备之物。

夏季避暑旅游，选登山是由于气温随海拔高度升高而降低。其温度递减率年平均约为 0.5～0.6 ℃/100 m。但 1 月较小约为 0.5 ℃/100 m，7 月较大约为 0.6 ℃/100 m。如泰山(1533.7 m)与泰安(128.8 m)，1 月平均气温分别为 −8.6 ℃和 −2.7 ℃；7 月分别为 17.8 ℃和 26.3 ℃。所以名山大川也成为夏季旅游的胜地。

1. 海滨避暑旅游

炎夏到海滨、湖岸消暑，也是利用气候资源。夏季海滨受海洋的影响，气温比内陆低 2～3 ℃，炎热日数也比较少。如日平均气温≥30 ℃日数青岛与大连未出现过，烟台平均每年出现不到 1 天，秦皇岛约 8 年才出现 1 天。又如日最高气温≥35 ℃的日数，烟台和秦皇岛每年只有 1 天，青岛平均每 2 年才有 1 天，大连未出现过。我国东南沿海的厦门只有 5 天。地处热带海南三亚和陵水仅 0.2 天，即 5 年才遇上 1 天。由于海风的调节，一天中高温的持续时间很短，成为盛夏避暑的好地方。海滨沙细浪平也是天然的海滨浴场。同时，两广和海南、台湾海滨、冬无严寒，风和日丽，海滨空气洁净且含有一定量的碘氯化镁和氯化钠，可以建立各种旅游和渡假村。

由于受海洋的影响，在海滨形成海陆风，白天由海上吹向陆地，称海风；晚上由陆地吹向海上，称陆风。盛夏海滨不但气温较陆地低，而且海风徐徐，带来了海上较温和湿润的气候，所以海滨湖岸亦为避暑胜地。

我国海滨城市很多，都在开发夏季避暑的这一气候资源。由于我国东南沿海、两广沿海以及台湾、海南沿海的气温虽比内陆气温低一些，但夏季气温还是在 28 ℃以上，人们仍感到炎热，且日较差小，所以著名的避暑胜地都在北方。

(1)北戴河秦皇岛的风景区由秦皇岛、山海关、北戴河组成。秦皇岛市位于渤海之滨，具有典型的海洋性气候，夏季无酷暑，最热月平均气温 24.5 ℃，比同纬度北京低 1.3 ℃，整个暑期平均气温 23 ℃，比北京和唐山低 2 ℃，日平均气温≥30 ℃的日数，8 年才会出现 1 天。日最高气温≥30 ℃的日数平均每年仅有 18 天，≥35 ℃的日数全年只有 1 天。夏季从 6 月下旬开始到 8 月下旬结束，平均 72 天。全年 62%的降水下在 7、8 月份，而且多夜雨。秦皇岛日照充足，雾日不多，海阔水深，风平浪静，沙软潮平，景色旖旎，环境幽静，空气湿润而清新，山海景色宜人，成为国内外盛夏旅游避暑疗养胜地。

(2)青岛位于山海之间，风景秀丽，气候宜人。盛夏，海风习习，暑气顿消。最热月(8 月)平均气温 25.1 ℃，比同纬度内陆低2 ℃；平均最高气温 28.5 ℃，比同纬度内陆低 4 ～6 ℃，极端最高气温 35.4 ℃，最高气温大于 35 ℃的日数每 5 年才有 1 天，而同纬度的济南每年 24.1 天。全年 50%的雨水降在夏季，且多夜雨和阵雨，既减轻了暑热，又清新了空气。这里有较多的日照，游人可在海边进行日光浴。青岛多海雾，以 4 至 7 月为多，7 月最多，雾多发生在半夜至次日早晨，中午到下午最少，持续时间以 6、7 月较长，7、8 月份常有台风影响，平均每年 1～2 次。

(3)大连属海洋性气候。夏季从 6 月底开始，到 9 月初结束，历时 70 天以上，最热月(8 月)平均气温 23.9 ℃，平均最高气温27.0 ℃，极端最高气温 35.3 ℃(6 月)，均较同纬度内陆为低。全年最高气温大于 30 ℃的日数仅有 6 天，是盛夏消暑的好地方。全年降水量的 63%在 6～8 月，以 7 月最多，平均降水日数有 13.1 天。此外，夏季海雾较多，7 月平均 11.4 天，最多可达 19 天，雾一般多发生在夜间和清晨，日出后即消散。对旅游者来说，掌握了海雾的生消规律，安排活动不会受影响。相对于内陆来说，这里的日照时数稍多一些，海水浴后可在洁净细软的沙滩

上晒日光浴。

(4)烟台具有典型的海洋性气候。这里从6月下旬开始入夏,直到9月上旬,夏季长达80天以上。最热月平均气温25.0 ℃,比同纬度内陆的惠民低1.2 ℃,日平均气温≥30 ℃日数平均每年出现不到1天,日最高气温≥30 ℃的日数平均每年只有25天,日最高气温≥35 ℃的日数平均每年只有1天,夏无酷暑。7、8月份雨水较多,每月有12个左右雨日,空气湿润。平均风速在3 m/s以上,因此,并不闷热,是中国北方最佳的旅游观光和避暑胜地之一。

其实北戴河、青岛、大连、烟台其他三季也是很宜人的,从避暑角度夏季海滨是黄金季节。

2. 高山、高原、草原避暑旅游

气温随着地势的增高而降低,但其降低的速度还与地形有关。一般地,每升高100 m,气温降低0.5 ℃左右,如表8.1.1。由表可见年平均气温递减率,五台山为0.61 ℃/100 m,黄山为0.51 ℃/100 m,泰山为0.53 ℃/100 m,峨嵋山为0.54 ℃/100 m。由表还可看出冬季递降较小,夏季递降较大。如泰山1月递减率为0.42 ℃/100 m,而7月为0.61 ℃/100 m。

表8.1.1 山麓与山顶平均气温对比

站 名	海拔高度(m)	1月	7月	年平均	年较差
泰 山	1533.7	−8.6	17.8	5.3	26.4
泰 安	128.2	−2.7	26.3	12.8	29.0
五台山	2 895.8	−18.3	9.5	−4.1	27.8
原 平	836.7	−8.5	23.1	8.4	31.6
黄 山	1840.7	−3.1	17.7	7.8	20.8
屯 溪	146.7	3.8	28.1	16.3	24.3
峨眉山	3 047.4	−6.0	11.8	2.0	17.8
东 山	4 24.2	7.0	26.0	17.2	19.0

坡向对气温影响很大,向阳坡温度递减率大于背阳坡,如黄山向阳坡为0.55 ℃/100 m,背阳坡为0.42 ℃/100 m;武夷山向阳坡0.63 ℃/100 m,背阳坡为0.48 ℃/100 m;长白山向阳坡0.55 ℃/100 m,背阳坡为0.47 ℃/100m。故有"南枝向暖北枝寒,一种春风有两般",虽这是咏大 岭梅诗中之句,也说明坡向对气温的影响。因此,夏季到高山或高原消暑避热旅游是最惬意的事情。

长江中下游在盛夏之际,高空受副热带高压控制,天气晴朗,似火的骄阳把大地烤得发烫,地面最高温度平均可达50~60 ℃,月平均气温在28 ℃以上,平均最高气温32 ℃以上,形成了我国夏季范围广大的高温区,人们以"火炉"来形容。

长江三大火炉的重庆、武汉、南京夏季昼间酷热非常,夜间气温也在25 ℃左右亦不凉爽,加上湿度大,使人闷热难当。其实长江中下游何止三大火炉,南昌、吉安、九江等地夏季气温并不比三大火炉低,在这些地方若登高山避暑是夏季理想的去处。

(1)庐山避暑 在炎夏酷暑,登山就会感到越高越凉,如庐山1 474 m处,7月平均气温22.5 ℃,平均最高气温25.9 ℃,而山麓的九江7月平均气温29.4 ℃,7月平均最高气温33.5 ℃,气温相差7 ℃左右,山下温高湿大,闷热难受,山上气候凉爽,真有"松里云深夏亦寒"的感觉。所以庐山是盛夏避暑的旅游胜地。庐山的云雾称风景一绝。庐山云雾变化无穷,特别是雨过天晴时,在庐山可见到大片波涛翻滚的云雾越过山顶,直泻山下,宛如高山泻瀑,云流连绵不

断，气势蔚为壮观。身临其境地者，真有“不识庐山真面目”之感。此时观云海有时还可见到“宝光”和“蜃影”。

(2)黄山云海　海拔 1 840.4 m，7 月平均最高气温 20.5 ℃，极端最高气温仅 27.1 ℃，而山麓的屯溪海拔 145.4 m，7 月平均最高 33.8 ℃，极端最高气温 41.0 ℃，山下山上凉热分明。山下是酷热的盛夏，山上却是仲春送爽。

黄山的云海，澜翻絮涌，变幻莫测，真是“云似山为体，山以云为衣”。郭沫若曾形容：“瞬息万变、万万变，忽隐忽现，或浓或淡，胜似梦境之迷离”。这是多么形象的写照。黄山雾日全年 250 天，由水汽凝结而成的小水滴，飘浮在空中的为云，悬浮在地面的叫雾。从山麓向上看黄山白云萦绕，身在其中烟雾缭绕，像轻纱把峰石、青松敷罩得千奇百怪，景象万千，构成一幅天然的画卷。夏季登黄山既可避暑旅游，又可观赏云海之美景。

(3)南岳衡山　属于亚热带中部湿润气候区，四季葱翠，风景绮丽，南岳有著名五峰：祝融、紫盖、天柱、芙蓉、石廪，主峰祝融峰望日台 1 265.9 m。整个山区层峦叠障，云遮雾绕。衡山终年气候温暖湿润，山脚下的衡阳 7 月的平均气温 29.8 ℃，山顶仅21.6 ℃，平均最高气温仅 24.8 ℃，极端最高气温 31 ℃，夏季仅有从 7 月 17 日至 7 月 29 日的十几天时间。盛夏成为避暑的胜地。7 月的降水日数 11.4 天，是全年最少的一个月。阴天日数也是全年最少的一个月。7 月日照时数 245.2 h，为全年最多的一个月，是到祝融峰顶观日出的极好时节。由于气候温暖湿润，云海也是这里的一景。

(4)峨眉宝光　峨眉山是我国佛教四大名山之一。主峰万佛顶海拔 3 099 m，金顶海拔 3 077 m。峨眉山是位于中亚热带的一座高山，随地势升高气温逐渐降低，山顶年平均气温仅有 3.4 ℃，最热月 7 月平均气温 11.8 ℃，平均最高气温 15.5 ℃，山下乐山 7 月平均最高气温 30.7 ℃，山上比山下气温低 15.2 ℃。山中林木繁茂，河流稠密，水汽丰富，年雨量 2 000 mm 左右，雾日多。由于山势高峻，水汽升至半山腰便形成云，站在山顶便可看见四周白茫茫一片云海，而山上仍有阳光照耀，当人站在山上，他的背后有阳光射来，人的前面弥漫着密云浓雾时，就会在他前面的云幕上出现一个人影或头影，影外围绕着彩色的光环，就像佛像头上的彩色光圈一般，这就是峨眉宝光。在云很浓密，云层上日光强烈斜射时，峨眉光的彩光相当鲜明，由外向内，红、橙、黄、绿、青、蓝、紫依次排列，有时也可以只见光环而不见彩色。当观看者站在太阳与光环之间，三者在一直线上时，则见人影映于光环之中，人静影亦静，人行影亦行。峨眉光一般在上午日出后半小时至 9:00 或在下午3:00后到日落前 1 小时出现。夏季登峨眉山可以避暑，同时还可在金顶的睹光台观日出、云海、宝光。

(5)东岳泰山　泰山主峰海拔 1 545 m，主要名胜有岱庙、中天门、南天门、天街、日观峰、玉皇顶及历代石刻等。“旭日东升”、“晚霞夕照”、“黄河金带”、“云海玉盘”为岱顶四大奇观。泰山玉皇顶和日观峰是观日出的地点。玉皇顶是泰山最高处，又称极顶，其东有一观日亭。日观峰在玉皇顶东南，峰北侧有一巨石悬空探出，称拱北石，或探海石，可在石上观日出。“旭日东升”是泰山最壮丽的胜景。观看日出必须在夏至前后各约 31 天，或冬至前后各约47 天内，而且天气晴朗无风，这时，有利于大气形成下层气温低而上层气温高的逆温现象，使空气密度下大上小，有利于大气产生折射，观者站在最高峰上视野距离混沌一片，突然东方天际变成鱼肚白，显出熹微的晨光，一会儿渐渐变成金黄色，太阳的光芒透过银灰色紫红云霞把东方染成美的彩霞，接着太阳徐徐升起，由乳白变桔黄，由桔黄变成一轮火球，冲破彩霞，跳出海面，升速极快，光芒四射。

泰山冬季寒冷，北风大，夏、秋季是观日出的最佳季节。盛夏山下泰安 7 月平均最高气温 31.3 ℃，泰山顶上 20.6 ℃，山下赤日炎炎，山上凉风习习，登山避暑、观日出是人们夏季向往的活动。

(6)佛教圣地五台山　是我国四大佛教圣地之一，位于山西太行山，寺院众多，成为造型优美的建筑群，五台山海拔 3 058 m，加之纬度偏北，夏季特别清凉，全年只有 7 月下旬到 8 月上旬这一段时间日平均气温略高于 10 ℃，五台山无夏天，7 月平均气温9.6 ℃，极端最高 20 ℃。山麓的原平 7 月平均气温 23.1 ℃，极端最高 40.4 ℃，山上山下气温相差悬殊。夏季去五台山避暑旅游是佳期，但千万不要忘记带秋衣，因为这里 7 月份的最低气温有时还可降到 0.2 ℃。

(7)西岳华山　华山有东、西、南、北、中五峰，似一朵莲花，故名华山。华山拔地而起，海拔 2 083 m，气温随地势升高而降低，华山顶峰年平均气温 5.9 ℃，比西安低 7.4 ℃，7 月平均气温 17.7 ℃，极端最高气温 27.7 ℃，极端最低气温 5.5 ℃。7、8 月份降水最多，占全年总雨量的 34%，一日最大降水量可达 120 mm 以上，月降水日数平均为 14 天；华山风大，而 7、8 月份是风速最小的季节，在 3 m/s 左右，是登山的最佳时间，“自古华山一条道”，华山以险峻著称。

(8)高山丛中九寨沟　在四川省南坪县，这里是白水江上游西支白河南岸连绵起伏的岷山山脉中的一条大深沟，海拔在2 000 m以上，沟内的高峰多在 4 000 m 以上，山大沟深，峰谷之间高差可达 2 768 m。在两山相峙间，有繁茂的原始森林，森林随山峰陡起有明显不同的垂直植被分布，从下而上是针阔叶混合林、针叶林、灌木丛，最高处是高山草甸。森林中生活着金丝猴、大熊猫、苏门羚、白马羚等珍贵动物，群山之上湛蓝的天空高翔着天鹅、野雁。九寨沟的景致奇特还在于在墨绿色的山林之中镶嵌着许多宝蓝色的海子，这些海子大小不等，深约 30 m 左右，湖水清澈明亮，树木的枝叶倒影十分清楚。这些大小不等的海子由激流、瀑布、泉溪相连接，远望如银链宝石，绚丽多彩。九寨沟被称为神奇世界，这里夏季短暂，仅从 7 月中旬到 8 月中旬的一个月时间，最热月 7 月平均气温 22.2 ℃，最高气温 35.8 ℃，夏季降水为全年总雨量的 50%，但雨量不大，气候凉爽。夏季是这里的旅游旺季。

(9)长白山天池　海拔 2 670.3 m，其北部有一高达 68 m 的瀑布。天池湖水似碧玉镶嵌在群峰之中，晴天时，常常是岩影波光，衬以朵朵白云，景色秀丽异常。天池附近有温泉，水温 38 ℃，是天然浴池，可治疗皮肤病、风湿病。长白山区最热月平均气温 20～24 ℃，在长白山主峰处日平均气温很难连续大于 22 ℃，因此属无夏区，气温有如春、秋。盛夏时节到此旅游可一睹北国山水风采。天池一带不仅无夏，日平均气温大于 10 ℃的时间也只有 10 天(7 月 28 日至 8 月 7 日)，7 月平均气温仅 8.6 ℃，平均最高气温 11.2 ℃，极端最高气温 19.2 ℃，而极端最低气温可达－9.5 ℃(6 月)。这里夏季降雨较多，占全年总雨量的 60 %以上，降水日数有 65 d 之多，平均风速 7 m/s 左右，因此夏季登天池须备棉毛衫裤和雨具。

(10)天山天池　天池是冰川泥石流堵塞河道而形成的高山湖泊，天池海拔 1 980 m，湖深 90 m。夏季，7 月天池的气温 15.3 ℃，最高气温为 20.6 ℃。年降水量 500 mm，夏季占 56 %。这里夏季犹如春天，十分凉爽。天池是一块难得的避暑宝地，每当盛夏，在戈壁沙漠区热浪灼人的时候，这里却是凉风习习。虽然盛夏时节，天池水仍然冰凉，但气候宜人仍是避暑、疗养的胜地。天池景色美丽，四周冰峰林立，松杉挺拔高大的原始森林，山坡上林木葱绿，牧草繁茂，百花争艳。

(11)日光城拉萨　高原古城拉萨，海拔高度 3 658 m，大气干洁、湿度低。这里 7 月平均气温 15.3 ℃，极端最高气温 29.3 ℃，夏季不热，年降水量 426.1 mm，多集中在夏季，全年日照

3 016 h，从日照时数看它并不是最多的，如青海冷湖可达 3 548 h，但拉萨太阳辐射特别强，全年地面接受的太阳总辐射为 8 474.5 MJ/(m^2.a)，比纬度较高的冷湖的 7 049.1 MJ/(m^2).a 多 1/6。故有“日光城”，之称。这里多夜雨，夜雨率占 80%，白天天空晴朗少云，湛蓝的天空，远处的雪峰银岭，清晰可见，市内玛布日山上布达拉宫殿宇嵯峨，气势雄伟。到拉萨旅游的人们无不感到心旷神怡。

(12)避暑山庄—承德　位于蒙古高原与华北平原的过渡带，海拔 400m 左右，四周群山环抱，地貌奇特多样。著名的罗汉山、棒锤山、蛤蟆石等镶嵌在盆地四周形成绮丽的自然景色。它的北部是清代康熙、乾隆年间修建的规模宏大、景色绚丽的避暑山庄，在它的东北面沿山麓分布许多风格各异的寺庙，即外八庙。避暑山区的大片森林绿地，造成了山城的小气候。夏季，月平均气温 22～24 ℃，比北京同期低 2～3 ℃，最高气温≥30 ℃日数 44 天，比北京少 20 天，夏季从 6 月 16 日开始，8 月 25 日结束，历时 71 天，候平均气温最高仅 24.9 ℃，夏季降水占全年总降水量的 70%，平均风速仅 1 m/s 左右，夏无炎热，清凉宜人。山庄“如意洲”上一个名曰“无暑清凉”的亭榭是当之无愧了。避暑山庄总面积$564\times10^4m^2$，比颐和园大 1 倍，沿着起伏的山势还筑有 10 km 的宫墙。山庄景致奇特，背山面湖，山峦起伏，草木蓊郁，宫殿亭榭掩映，湖沼洲岛错落，风光旖旎巧夺天工。

(13)草原之夏　内蒙古自治区有辽阔的草原，从东北部的呼伦贝尔草原经锡林郭勒大草原到西部的鄂尔多斯草原为止。夏季，草原的天空又高又蓝，这里空气清新，景色宜人。6 月上、中旬至 8 月中、下旬为夏季，东部稍短，西部稍长。大兴安岭北部地区 7 月平均气温在 18 ℃以下，锡林郭勒草原在 20.8 ℃，鄂尔多斯草原在 22 ℃以下。极端最高气温，除西部地区由于靠近沙漠和下垫面影响较高外，一般多低于 30 ℃，高温出现的时间短促、盛夏 7、8 月份正是华北平原和长江中下游地区的酷暑时节，但却是草原的黄金季节，整个草原是一望无际的绿色草场，草原上五颜六色，野花盛开，一群群牛、羊、马在草原上自由自在地游荡，牧草在微风中起伏宛若绿色的海洋。使人想起“天苍苍，野茫茫，风吹草低见牛羊”的佳句。这里湿度较小，昼夜温差大，炎夏时节热而不闷，早晚十分凉爽。夏季到草原旅游避暑，不仅因其气势辽阔而振奋，也被其醉人的草原、牛、羊群、蒙古包和手扒羊肉所迷恋。

(三)春、秋旅游

春、秋是由冬过渡到夏和由夏过渡到冬的转换季节。春季是夏季风开始活跃，冬季风势力逐渐减弱。相反地，秋季是夏季风逐渐减弱，冬季风又开始活跃。在这种季风影响下，春季全国气温回升的很快，除了黑龙江北部一部分和青藏高原西北部在 0 ℃以下外，都在 0 ℃以上。春季的特点是气温升温快，而且升温北方比南方幅度大。如沈阳从 1 月的－12.0 ℃升高到 4 月的 9.3 ℃，升温 21.3 ℃，乌鲁木齐从 1 月的－15.4 ℃升高到 4 月的 9.0 ℃，升温24.4 ℃，北京由－4.6 ℃升高到 13.1 ℃升温 17.7 ℃，武汉由3.0 ℃升高到 16.1 ℃，升温 13.1 ℃，广州由 13.3 ℃升高到21.9 ℃，升温 8.6 ℃，这是由于北方气候干燥，太阳辐射强，其热量基本上增温大气，而南方湿润多雨，地面吸收热量少，且有一部分热量消耗在水分的蒸发上，所以北方比南方升温快。

秋季全国气温分布与春季非常相似，所不同的是 10 ℃等温线秋季比春季偏南，而 20 ℃等温线比春季偏北，这是因为我国北方春温高于秋温，南方秋温高于春温的缘故。

从日较差来看，我国北方日较差最大在春季，最小在秋季，南方日较差秋季大，春季小。年日较差最小在沿海和海岛上，最大在青藏高原。以地形而论，山顶日较差较山麓为小。

从降水量来看，北方是秋雨多于春雨，南方是春雨多于秋雨。但在四川东部、青藏高原东部边缘及海南由于地形雨和台风雨的影响，秋雨多于春雨。

春、秋季全国除了无夏或无冬、春、秋相连的地区外，其他地区四季分明。四季分明的地区，大致分布在东北平原、西北地区、华北平原、长江中下游广大的地区。从气候角度看，春、秋季在这些地区可以说随处都是旅游的黄金季节，但春、秋季一般仅 4 个月左右，为时甚短，也是美中不足之处，真可谓“良辰易遣”之感。

1. 海滨旅游

(1)蓬莱仙境　蓬莱处于渤海和黄海的分界处，北部海面散布着长山列岛，南为丘陵山地。登蓬莱阁可俯瞰大海，这里可观赏“蓬莱仙境”。春、夏时节，气温回升陆地比海面快，白天，海面上气温比陆地上低，空气密度较大，当陆地上暖空气流到海上时，在海面上形成了上下密度不同的空气层结，当阳光穿过空气层时会产生折射和反射，下层密度大的空气像镜子一样把地面景物反射到半空中，于是只见远处海面的半空中突然出现山峦，树木，楼阁，人物，时而清晰，时而漂渺，宛若神仙境界，称为蓬莱仙境。这是一种海市蜃楼。晴天少云及无风或微风时常在海面上存在着明显的不同密度的空气层结和强烈逆温，空气层结越稳定，蜃景持续时间越长。

(2)海天佛国普陀山　位于浙江舟山群岛中的一个小岛上，最高处为佛顶山，海拔 283 m。属海洋性季风气候，1 月平均气温5.5 ℃，平均最低 3.2 ℃，4 月平均气温 13.8 ℃，7 月 26.3 ℃，平均最高 29.7 ℃，10 月 13.3 ℃，年平均气温 16.2 ℃。年降水量947.8 mm，多夜雨。春季多雾，幻景莫测，登山如入神话世界，夏季白天最热仅 30.1 ℃，秋季天高气爽，观日出是东海绝景之一，冬季很少见冰雪，比较暖和。冬暖夏凉，四季树木常青，葱郁如春，风景秀丽，洞幽岩奇，洪波浩渺，云烟缭绕，向以“海山第一”、“海天佛国”著称于世。

普陀山是中国佛教四大名山之一。著名三大寺普济寺、法雨寺、慧济寺。此外还有几十处寺院。登普陀山最高处，在有低云时，可见云浪滔滔、孤峰如岛，人行其间若隐若现，景移其中，若有若无。不论晴天，还是烟雨溟蒙，景色均变幻莫测。这种奇观是云雾在海上的变化形成的。华顶山即佛顶山之顶也因此而被人称佛顶山、菩萨顶。连所产的云雾茶称为佛茶。

2. 湖滨旅游

(1)四季皆宜游西湖　杭州是我国六大古都之一，南宋建都后，西湖也大量兴建各种亭台楼阁，塔寺庙宇。

西湖四季分明，3 月下旬春季来临，到 5 月下旬，春季长 2 个月，夏季从 5 月下旬到 9 月下旬长 4 个月，从 9 月下旬到 11 月下旬为秋季，长 2 个月，从 11 月下旬到 3 月下旬为冬季，长 4 个月。杭州冬季虽长 4 个月，但不甚寒，1 月平均气温 3.6 ℃，平均最高气温 8.1 ℃，平均最低气温 0.3 ℃。冬季仍有降雪日 10 天左右，只要有一场降雪，雪后湖山之景，更为诱人，雪融过半时，呈现黑白斑驳，有时远观，可见到桥体若断一半之状，故有“断桥残雪”美景。西湖春天，百花盛开，飘拂的柳丝和茸密的草坪与清澈湖水相映，耳闻莺鸣。“柳浪闻莺”、“苏堤春晓”便各成为西湖十景之一。西湖夏季气温较高，7 月平均气温为 28.7 ℃，平均最高气温33.4 ℃，降水丰富，夏季降水量为 458.5 mm，占全年降水的 33.3 %，故而林木葱翠，到处有绿荫。西湖中有岛，岛中又有湖，由于湖面气温较陆地为低，形成风从湖面吹向岸边的湖风，使游人感到阵阵爽适的微凉风，也很惬意。秋季西湖赏月是一胜景，三潭印月、平湖秋月以及中秋钱塘江观潮称得上是“天下奇观”。西湖四季山水秀丽，园林优雅。西湖之妙，在于湖里山中，山屏湖外，登山兼可眺湖，游湖亦并看山，故称之为“天上人间”也不为过。

(2)太湖之滨的苏州和无锡　长江下游太湖流域属北亚热带季风气候，四季分明，年平均气温16 ℃左右。冬季，1月平均气温3 ℃左右，极端最低气温可到－10 ℃以下，冬季虽不寒冷，但因湿度较大，令人感到阴冷。夏季从5月底6月初开始，直到9月中旬，最热月7月平均气温28 ℃左右。一年之中以春、秋季节气温适宜。这里3月下旬开春，4月的平均气温14～15 ℃，平均最高气温19～20 ℃，气候宜人，春季时间短暂，仅60天，而且从6月上旬进入梅雨时节，降水逐渐增多，因此春天时常烟雨蒙蒙，不过，这也使江南景色变得朦胧缥缈，别有一番诗情画意。秋季，受北方冷空气影响，从9月底开始，天气晴好，10月平均气温17～18 ℃，月雨日8～10 d，白天阳光灿烂，夜里晴空皓月，桂花飘香，是旅游的黄金季节。太湖之滨无处不是景，自西向东迤逦行来，苏州广植花木，古柏参天，四时开花不绝。可观赏园林艺术：沧浪亭、狮子林、拙政园、留园；无锡山清水秀，有惠山、锡山、蠡园、梅园、鼋头渚，惠山脚下的寄畅园别具一格，北京颐和园中的谐趣园正是以此为蓝本建成；宜兴有善卷洞、张公洞，洞中水可泛舟。

(3)洞庭湖滨岳阳　洞庭湖是我国最大的湖泊之一，岳阳在其东北岸，海拔52 m，1月平均气温4.4 ℃，极端最低－11.8 ℃，7月29.2 ℃，极端最高39.3 ℃，由于湖泊的影响，气温比陆地冬暖夏凉。岳阳楼是我国素负盛名的古建筑，有“洞庭天下水，岳阳天下楼”之说。岳阳楼地势高峻，建筑雄伟壮丽，富有民族特色，四角的飞檐有翩翩欲飞之感。下瞰洞庭，湖光山色，景物宽阔，气象万千。李白诗句：“楼观岳阳尽，川回洞庭开，雁引愁心去，山衔好月来”。真是一个很好的写照。

(4)滇池滨春城昆明　昆明海拔1894.7 m，具有低纬高原的独特气候。昆明四周群山环抱，滇池波光粼粼。冬季，北部山脉阻挡冷空气侵入，南部印度大陆的暖气流不断涌入，因而气候温和。1月平均气温7.6 ℃，虽然低于10 ℃，但因冬季晴天多，日照充足，空气干燥，白天气温较易升高，平均最高气温在15 ℃以上，冬无严寒。7月平均气温19.7 ℃，基本无夏，一年四季阳光明媚，叶绿四时，花开不败，古人曾赋诗：“万紫千红总不谢，冬暖夏凉四时春”，故得春城之美称。年雨量1 006.6 mm，11月至次年4月是干季，总雨量仅为全年雨量的12 %，平均月雨日仅4～8天；5至10月是雨季，总雨量为全年雨量的88%，每月平均有12～21个雨日，不过，雨季多夜雨，特别是6至9月，夜雨率达60%～79%。昆明地处高原，昼夜温差较大，特别是11月至次年5月，日较差可达13 ℃。昆明气候温和，雨量充沛、四季如春，植被繁盛、花卉众多，全年鲜花开放，是天然植物园。1999年在此举行世界园艺博览会，是理所应当的了。昆明的风景名胜主要有翠湖、筇竹寺、滇池、大观楼、西山海埂等。登大观楼远眺，滇池烟云浩渺，拨浪千层。“天下第一汤”安宁温泉，位于滇池出水的螳螂川畔，温泉水碧如玉，清澈透明，是一个理想的疗养胜地。距昆明120 km处的石林，别具一格的天然石景，也是旅游的胜地。

3. 内陆旅游

(1)“火洲”吐鲁番是我国的“热极”，年平均气温13.9 ℃，7月最热，平均气温32.4 ℃，极端最高气温47.6 ℃，6至8月平均最高气温38.2～39.9 ℃，最高气温≥40 ℃日数全年37.6d，≥35 ℃日数全年95.4天。地表最高温度多在70 ℃以上，沙地可达82 ℃，沙面烫脚，并能烤熟鸡蛋，所以有“火洲”之称。吐鲁番年雨量不过16.4mm，空气湿度很小，夏季仅30%，故热而不闷。在吐鲁番盆地中部有一座海拔500 m左右的低山，由红色砂岩组成，夏季，阳光照在红色的砂岩上，红光闪耀，似阵阵烈焰，这就是传说中的火焰山。但秋天这里气温宜人，是旅游的好季节。9月平均气温23.1 ℃，10月13 ℃。由于有丰富的热量资源和光照条件，盛产瓜果，如白葡萄、马奶子葡萄、哈密瓜等，著名于世。

(2)四时宜游芙蓉城 成都位于四川盆地西部，是一座具有2 300多年历史的文明古城。气候暖和，霜雪不多，雨水丰沛，终年湿润。花木繁茂，四时常开。成都春来早，3月初已是春暖花开，夏季平均5月下旬至9月上旬，长110天，夏虽长而不炎热。极端最高气温仅37.3 ℃，7月平均气温25.6 ℃。多雨是夏季不酷热的重要原因。成都6～8月降水557 mm，占年降水量的60%。盛夏纳凉好去处，杜甫草堂翠竹森森，风送荷香。武侯祠古柏参天，荫翳蔽日。秋季始于9月中旬，每当金风送爽，数千株桂花盛开，到桂湖赏桂，使人心醉。冬季11月末开始，终于2月底，1月平均气温5.5 ℃，极端最低气温－5.9 ℃。而最低气温在0 ℃以下的日数1年仅13天，所以隆冬仍是林木苍翠。

著名的都江堰在其西北，海拔高出成都约200 m。夏季平均气温比成都低1 ℃左右。都江堰邻近的青城山，以风景清幽而闻名，气温比成都低6 ℃，夏季登此山凉爽宜人。

(3)风景明珠张家界 位于湖南大庸县，属武陵山脉，海拔最高处1 334 m。由国务院批准成立的第一个国家级森林公园。气候暖和，年平均气温15 ℃左右，年降水量约1 400 mm。一年四季都可旅游。张家界是原始风光自然美，有众多座奇山异峰，高耸入云，青山红岩，层次分明。溶洞群布，古木参天，溪水连绵。这里许多山峰都是拔地而起，既有孤峰独影，又有松林盖顶。山峰的姿色，又随着气候的不同而不断变幻。春天百花盛开，夏天林海绿浪，山泉漫小桥。秋天山峰透亮，林木泛黄，红叶如火，白云飞飘。冬天白雪茫茫一片，壁挂冰凌，座座水晶。四季景色异常，使人赏心悦目。

(4)桂林山水甲天下 桂林属亚热带湿润气候，年平均气温18.8 ℃，最冷月平均气温7.9 ℃，最热月平均气温28.3 ℃，年降水量1 900 mm，年雨日175天。春季从3月15日开始，雨水增多，4～8月是雨季，降水量占全年总雨量的70%以上，月平均雨日15～20天。9月以后，雨日陡然减少，每月仅9天左右，而且秋季多夜雨。桂林山水甲天下，北起兴安南到阳朔的100多公里间，诸峰拔地而起，形态万千。桂林山中多岩洞，洞内石笋、石柱、石幔、石花，形态各异，洞内温度常年保持20 ℃左右，使人有冬暖夏凉的感觉。七星岩雄伟深邃，玉雪晶莹，景物丰富，奇幻多姿，琳琅满目。芦笛岩中有大量天然石钟乳组成的各种景物，有大自然艺术宫之称，桂林至阳朔沿江一带群峰峭拔，绿水萦绕其间。

(5)黄果树瀑布 黄果树瀑布高60 m，为世界第二大瀑布。白水河流经黄果树地段时，河床断为9级瀑布，黄果树瀑布为其中最大的一级。黄果树瀑布气势磅薄，雄伟壮观，瀑布从60 m高的悬崖跌入犀牛潭中，飞瀑倾泻如万马奔腾，数道宽阔的水帘拍石击水似劈雷、山崩。这里夏无炎热，7月平均气温仅21 ℃左右，平均最高气温仅24～26 ℃，极端最高气温32～34 ℃，年降水量约1 340 mm。5至10月降水较多，约占年降水的84%，每月平均雨日近20 d，所以观瀑布这个时期最佳。

二、古迹保存和古迹增奇与气候

激起人们去旅游的心理原因，常常是兴趣、猎奇、求知、向往等。

我国名胜古迹之多是世界上少有的。游览名胜古迹和气候关系较小，但气候对古迹的保存及增添游览的气氛却有很大的关系。

(一)干燥气候有利于保存古迹

我国的6大古都北京、西安、洛阳、开封、南京、杭州，由于年代的久远，保留较完整的是北方气候较干燥的北京、西安、洛阳和开封。这可能是干燥气候条件下，不利于各种微生物的活

动，使古迹不易被霉菌和其他昆虫所损破的结果。

表 8.1.2　六城市降水量及相对湿度

要素	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
北京	降水量(mm)	2.6	5.9	9.0	26.4	28.7	70.7	175.6	182.2	48.7	18.8	6.0	2.3	577.0
	相对湿度(%)	43	47	49	48	53	61	76	79	70	64	58	49	58
西安	降水量(mm)	6.4	10.7	26.4	49.5	65.4	51.0	92.8	66.7	107.5	65.6	25.6	5.5	573.0
	相对湿度(%)	66	66	67	70	71	61	72	75	81	79	76	70	71
洛阳	降水量(mm)	6.9	12.5	25.4	45.1	47.0	66.3	141.5	95.8	74.7	46.0	30.6	9.3	601.1
	相对湿度(%)	57	61	62	61	60	56	75	77	73	70	68	59	65
开封	降水量(mm)	6.4	10.4	24.2	43.6	43.4	81.3	166.6	118.9	64.3	39.4	26.4	9.4	634.2
	相对湿度(%)	64	66	65	64	63	61	79	81	76	72	71	76	69
南京	降水量(mm)	28.8	48.1	68.8	86.6	96.4	159.2	187.5	123.7	95.1	59.9	55.6	24.5	1034.1
	相对湿度(%)	74	75	74	75	75	78	82	81	80	78	77	74	77
杭州	降水量(mm)	58.6	87.5	114.6	129.9	158.8	184.7	128.9	144.9	171.2	89.3	58.1	48.3	1374.7
	相对湿度(%)	75	78	79	79	79	82	79	80	83	80	76	74	79

从这六个城市的降水量和相对湿度来看，北方远小于南方，如表 8.1.2。由表可见，北方的降水量在 600 mm 左右，南方为1 000 mm以上。相对湿度北方为 60%～70%之间，南方在 77%～79%之间。北方相对湿度较大的集中在夏季几个月，其他月份在 50%～70%左右，而南方全年各月相对湿度均在 74%以上。由此可以推断湿度对保护古迹有一定的影响。

北京是一座历史悠久的文化古城。北京除夏季炎热多雨，相对湿度大外，其他各月降水少、相对湿度小，气候温和，晴天多，有利于古迹保存，位于北京中心占地 $72\times10^4 m^2$ 的故宫，是世界上现存最大、最完整的古代木结构建筑群，已有 580 年的历史；北海自始建于金代距今 820 年历史；天坛是明清祭天和祈谷的地方；太庙是明清两代祭祀祖先的建筑，现名为劳动人民文化宫；八达岭长城、居庸关、雍和宫、碧云寺、谭拓寺、戒台寺、居云寺（千年石经）以及明十三陵等基本保护完好。

西安古城有保存完好的明代城墙、钟鼓楼,有保存大量石刻艺术的碑林,有唐代玄奘高僧的译经地大兴善寺(大雁塔),有6 000年前的半坡人村落遗址。东距西安 20 km 的临潼县有秦始皇墓葬兵马俑坑。唐代的华清池位于骊山脚下,山色青翠,池水涟漪,并有温泉可供沐浴。从西安向西有唐代帝王陵墓,扶风法门寺有释迦佛指骨舍利等。

洛阳古城在东周、东汉、三国、魏、西晋、北魏、五代后唐等均建都于此,现保存名胜古迹有北魏时期的艺术宝库龙门石窟,这些石窟分布在伊水两岸的崖壁上,石刻造像,神彩四射,气势磅礴,成为世界文化遗产。还有建于东汉永平年间的白马寺,至今已 1 900 多年,是我国"僧寺之始"占有一定历史地位,寺址没有迁动过,因而汉时台、井还能依稀可寻。

开封古都在五代、梁、晋、汉、周及北宋皆建都于此,古称汴京、汴梁。保存的古迹有繁塔,建于北宋开宝年间,距今一千多年;铁塔也建于北宋;龙亭是北宋巍峨壮丽的皇宫所在。

南京是南朝宋、齐、梁、陈建都的地方。明太祖朱元璋也是定鼎金陵。古迹栖霞寺舍利塔,建于南齐永明年间,现存殿宇为近代重建、朝天宫为春秋吴王夫差铸剑处,现存建筑为清末所造、瞻园建于明初,今存建筑均为清末所筑、明故宫遗迹仅有五龙桥、御河一段与午门城基、灵谷寺明迁现址,现山门为清末所建,仅放生池及无量殿尚为明时旧物。帝王的陵墓有不少,但南朝时陵墓是,墓不起坟,只有神道石兽等。明孝陵有陵冢也是清同治年间重修的。

杭州的灵隐寺始建于东晋,现在的灵隐寺是 19 世纪以来经多次修整重建的。六和塔创建于宋开宝 3 年,现存的六和塔系光绪 26 年照原样修建的,保俶塔建北宋初,现有塔是 1933 年按原样重建。

由以上大致可以看出,南方古迹保存时间较北方为短,虽现存的很多但大都是以后重新修整或重建。当然这里面也有人为破坏的因素,气候因素也可能有一定的关系。

(二)干旱气候适宜保存古迹

敦煌莫高窟是人类最伟大的艺术宫,至今保存着北魏、西魏、北周、隋、唐、五代、宋、西夏至元代壁画、彩塑的洞窟 492 个,唐、宋时代木结构建筑 5 座。当欣赏这些历时千年的壁画和彩塑艺术品的时候,不禁想起艺术珍品之所以久经沧桑而少剥蚀,长葆光彩照人,这肯定与当地干旱气候有关。

敦煌的气候特点是干旱,年降水量仅 36.8 mm。最多降水月为 7 月也仅 12.1 mm,整个夏季降水量为 24.1 mm,其他各月降水约在 0.7～2.9 mm 之间,所以气候干旱。年平均相对湿度 41%,3～6 月仅 32%,年日照时数 3247.1 h,每天平均 8 小时 54 分钟,阳光充足。如此干旱和日光丰富的气候,显然利于彩塑和壁画艺术品的久存,而且这些艺术珍品存于窟内,更可大大减少风沙侵蚀之害。从风的资料来看,敦煌一带的年平均风速 2.2 m/s,是这一地区风速最小的。至于沙漠地区特有的尘暴天气,这里也相当少见,全年仅 15 天,春季各月分别为 2.8 天(3 月),2.4 天(4 月),2.3 天(5 月),其他各月均在 1 d 以下。这就更有助于石窟壁画的保存了。新疆吐鲁番柏孜克里石窟(也称千佛洞)也是由于气候干旱而保存下来的,等等。

(三)云雾增添"神奇"

我国四大佛教圣地中,四川峨眉山是普贤菩萨(大行)的道场,山西五台山是文殊师利菩萨(大智)的道场,浙江普陀是观音菩萨(大悲)的道场,安徽九华山是地藏菩萨(大愿)道场。这四大佛教圣地由于云雾增添了许多神奇的色彩,其中尤以峨眉宝光最负盛名。

五台山、峨眉山、九华山、黄山、庐山、雁荡山、武夷山、华山等都有云海的景观。雾潮云浪在游人脚下涌动,四周云烟飘荡变幻,使人有腾云驾雾之感,似入仙境。故有"山不在高,有仙则

灵”。

在普陀山也可观到蜃景，在过去科学不甚发达的时代，人们就冠以“仙”“神”之意。

第二节　体育与气候

体育比赛和很多盛会，如山东潍坊的风筝会、河南洛阳牡丹节、广东龙舟节等，都和气象有很大关系。

一、大型运动会与气候

(一)运动会地址和日期的选择

我国从1959年以来已举办了9届全国运动会，前4届的地点都是北京，第7届又是北京，只有第5和第6届分别在上海和广州举行。国际奥运会地点的确定主要考虑当地的承办能力，体育设施的完备性和服务的质量等条件。但地点确定后，气候就是主要考虑的因素之一。

首先，运动会时间的选择要分析当地气候特点，以便最大可能地保证运动会顺利进行，同时有利于运动员发挥最佳的竞技水平。在北京举办运动会一般都安排在9月中、下旬到10月上旬。1990年在北京举办的第11届亚运会也安排在9月22日到10月7日。因为北京这一段时间是雨季之后，气候温和，风速是1年中最小的。在长达15～20天的时间内，要完全不下雨，不吹风是不可能的，但出现雨和大风的概率是很小的。

第5届全运会在上海举办。由于大雨，开幕式后延了两天，给组织工作带来麻烦，经济损失也很大。1997年第8届全运会又在上海、日期定于10月12日开幕，这是因为上海从120年气象观测资料来看，10月8～23天无雨概率为80%，平均气温为18～20 ℃，也没有出现过6级以上大风。广州根据当地气候，将六运会定在11月20日～12月5日，这段时间内广州降雨少，气温等较为合适。开幕时也下了短暂小雨，但未造成大的影响。

1952年奥林匹克冬季运动会在奥斯陆举行。举行日期计划定在1月到2月任何一个连续10天。气候工作者根据要求，进行气候分析，最后提出了最适宜的10天。冬季运动会约2/3的比赛离不开雪，要举办冬季奥运会，首先选在多雪的地方，而在运动会期间，最好无暴风雪天气。第9届和12届冬季奥运会在奥地利举行，都因缺雪，调动几百辆卡车和大量军队将雪运到滑雪跑道上，造成很大损失。第13届冬季奥运会时美国在普来西湖准备了9架造雪机器，结果湖区下了一场暴风雨，人们欢呼“下了白色的金子”。1996年2月5日第3届亚洲冬运会，将滑雪场选在我国黑龙江的亚布力，往年入冬后，经常下雪，可1996年入冬以来仅下了三次雪，给滑雪带来困难，所以组委会组织大量人力向滑雪场的山上背雪，等等。

国际足联规定，世界杯比赛场地必须是南北方向，这主要是南北向对运动员来说射到球场的光都是侧光，避免阳光直射入眼。大连体育场忽视了这个规定，而建成东西向，故此大连人民体育场在世界杯亚洲区决赛场地，中国队主场被否决了，最后定在大连金洲体育场，本可容纳8万多人的场地，改成只能容纳3万人的场地，这一方向的错误，变成了一座不能用作国际比赛的体育运动场。

(二)训练、比赛与气候

1993年10月西班牙圣赛瓦斯蒂安世界杯马拉松赛，女子组前4名全由中国包揽，震惊了世界。其实1993年8月在斯图加特第4届世界田径赛上，她们也曾夺得女子中长跑项目的3

枚金牌，当时已引起了世界关注。1993 年 9 月我国 7 运会，这些女将又几次刷新世界纪录，为中国田径运动挤身世界之林作出了很大贡献。被人们称为“马家军”的女将们一次次地获得了胜利，这是她们的马俊仁教练利用高原气候资源的特点进行训练的成果。

当高原海拔在 2 300～2 600 m，经科学测试，运动员通过高原训练，人体红细胞数和血色素明显得到代偿性提高，这可提高血液对肌肉的供氧量，使人在剧烈运动时，可推迟疲劳极限，所以，国际体育界认为体育运动成绩提高的重要因素在于比较适宜的高海拔地区的缺氧训练。高原气候的特点是气压较低，空气密度小。如高原训练场的多巴，在西宁西北 20 km 以远，海拔 2 368 m，这里年平均气压约 775 hPa，年平均气温 5.5 ℃左右，空气密度0.94 kg/m^3，平原为 1.23 kg/m^3，多巴空气密度为平地的 76 %，高原上空气中含氧量比平原要少。在这种自然环境下训练，能刺激体能，提高造血系统功能和氧的输送机能，有助于运动员耐力、速度和灵敏度的提高，肌肉运动供能情况的增强以及内脏器官的调节，从而达到耐久性运动项目提高成绩的功效。马教练曾举例说明，如果一个运动员的肺活量是 3 200 ml，要让她 4 分钟跑出1 500 m 的水平，心脏是承受不了的。通过高原条件训练，肺活量达到 4 800 ml 以上，那就完全可以了。

我国在高原的田径训练基地，除青海外，在云南的呈贡也有。其他项目如足球、排球等也有高原训练基地。

比赛与气象条件也有很大关系。例如第 6 届全运会，广州受南海台风和北方寒潮的双重影响，一度风雨交加，日平均气温连降 18 ℃之多，对于这百年不遇的天气，尽管事先作出预报，运动员也只能在风雨中顽强拼搏，大大影响了运动水平的发挥。

第 19 届奥运会，1968 年在墨西哥城举行，其中男子 100 m、400 m 和跳远的成绩，至今仍未打破，有人认为这是受高原气候的影响。墨西哥城海拔 2 259 m，空气密度小、风压也小，也就是迎风的阻力相应减少。这次比赛除空气密度小外，当时还有2.0 m/s的风速，这是规定允许的最大风速，赛场跑道正巧是顺风。所以风速、风向也有利于促进出好的成绩。世界田径比赛只规定了风速不能超过 2.0 m/s，但没有规定风向这也是不科学的。

气温、风、湿度等马拉松比赛的影响也很大，气温过高会增加运动员体内能量消耗，随汗液排出的氯化钠、钙、钾、镁等元素也较多，易引起肌肉抽筋。气温过低肌肉会发生痉挛。空气湿度过大，不利于汗液的蒸发，也就是不利于身体散热。风速、风向则会影响赛跑的速度。

足球比赛是风雨无阻的。雨中踢球，由于水的阻力，球的移向、移速、落点与晴天相比，会有变化。顺风和逆风对球员施于足球的力有加强和减弱作用。

此外，舢板、射击、射箭、自行车等运动项目中，风都会直接影响成绩，掌握得当有利于出好成绩或夺魁。

二、盛会与气象

一些盛会如冰雕节、风筝节等是人们利用气候资源，进行一定程度的艺术加工后形成的。

哈尔滨的冰灯是国内外著名的，每年元月 5 日举办冰雪节。这是充分利用哈尔滨的冬季气候的结果。虽然北京龙庆峡也有冰灯，但较哈尔滨的规模小、时间短、这主要是北京冬季气温为 －3.2 ℃，较哈尔滨高得多所致。

洛阳牡丹甲天下，4 月洛阳看牡丹，洛阳 3 月底入春，4 月平均气温 15.4 ℃，5 月为 21.3 ℃。牡丹生性宜寒畏热，喜燥恶湿，喜阳光惧曝晒。洛阳气候正好适宜，所以才有了一年一度的牡丹花会。

广州花会在冬季。因为广州夏季长达190天之多，而且湿度大、降水多、春节前后气温在14 ℃左右，湿度较小。适宜温带、亚热带花卉开放。”

风筝节和气象条件的关系更为密切，如1988年北京首届国际风筝会，4月11日和13日两天都因有8级以上的大风而使比赛中断。1989年国际风筝会时有一组大型串风筝“七仙女下凡”，因风太小，只有3级，没有达到这组风筝要求的4级风，刚离地面就落下来。放风筝风力太大不行，太小也不行，一般2～5级较适合。具体的适宜风速，需根据风筝的大小决定。

世界园艺博览会在昆明，主要是由于昆明夏无酷暑，冬无严寒，四季皆春，宜于各种植物生长，长达半年的干季对会期长也是很大的优越性。

第三节 商业与气候

由天气变化引起的商业销售和商品储存，已引起经济学家的关注，视天气为一种“财源”的观点，在经济界和产业界正在得到认可。

一、商品销售与天气气候

(一)季节变化与销售。商品销售受气候的影响很大，商品销售品种因地区和季节而异。各个季节的服装，小家电(如夏季的电扇、空调，冬季的加湿器、电暖气等)、汽车防雪胎、抗冻剂、防雨用具等销售都受气候条件的制约。

气温对消费行为影响很大，当气温达到 22 ℃时，喝啤酒的人数大幅度增加，德国啤酒商统计，夏季气温每升高1 ℃，德国人会多喝230万瓶啤酒，厂商则根据气温来调整产量。日本调查气温由33 ℃升高到34 ℃，啤酒销量增加1×10^4t。

气温对空调销售火爆有直接关系。北京1997年和1999年两年平均出现罕见的高温，如1999年7月平均降水量83.8 mm，不足常年的一半，平均气温为27.8 ℃，比常年偏高2 ℃，是仅次于1997年的第二个高峰年。在7月里日平均气温超过30 ℃的日数，多年平均不足1天，而1999年多达12天，比历史上最炎热的1942年、1997年出现的6天还多一倍。日极端最高气温在35 ℃的日数为13天，多年平均仅为2.7天，比历史上日数最多的1997年还多2天。历史上7月的极值最高气温为40.5 ℃，出现在1942年和1943年，而1999年7月24日达到了42.2 ℃，创历史记录，所以北京长时间酷热，使空调销售火爆，供不应求，出现断挡的情况。而且电风扇也卖得很红火。随之而来的是城区用电负荷骤增，一台空调功率一般在1 000～3 000 W之间，所以每安装1台空调将增加负荷1 000～3 000 W。如1997年北京城区10kV输变电线路和各居民区主变压器超负荷，造成二次保险丝熔断，居民小区频频掉闸、电表屡屡被烧，仅7月8～16日出现大小事故704起。

夏天的冷饮与气温高低有很大的关联。南昌1991年初夏，冷饮生产厂从省气象台获悉7月15日起将有一段高温酷暑天气，事先安排生产，挖掘各种潜力生产冷饮，结果出现35 ℃以上天气15 d，38 ℃以上的天气8 d，使储备冷饮销售一空。据报导气温超过29 ℃，雪糕比冰激凌销量大，超过31 ℃，碳酸饮料，矿泉水又比雪糕销量大。甚至痱子粉、花露水、樟脑丸、人丹、风油精、灭蚊剂等都十分畅销。

气温与服装，在长夏无冬的华南地区，棉衣、皮毛制品等商品，多半无人问津。可是在北方和青藏高原是人人必备的冬季服装，这类商品不但地区性很强，而且季节性也很强。所以一些

专门的产品需要气候的咨询。

降雨天是雨具销售最多的时期，也是夏季的畅销物品，同时，雨具是外出旅游必备之物，但若到降水稀少的西北戈壁沙漠、内蒙古草原去旅游则不必购置雨具。在北方，车辆的防雪胎、抗冻剂以及滑雪，滑冰装备等，开展这些业务的关键环节是受气候条件所制约的。当天气条件适合的时间才开始销货，例如，当气温降到临界温度时，防冻剂才能旺销。这就意味着制造厂和销售商必须把生产与气候相结合起来。

现在不少城市的人在假期或闲暇时，都有回归山野、贴近自然的愿望，市场出现了适应当地气候的山野旅游专用的露宿睡袋，简易帐篷，远足背袋等装备，这就要求出售地区与产品间的盛行气候条件相一致，在这种情况下，势必需要向气候工作者咨询，以使正确地确定各种产品适应的地区和时间。

(二)天气变化与销售

狂风暴雨的天气，台风到来之际，大雪纷飞的日子，风沙弥漫之时，人们一般很少外出去商场购买物品，这样的天气里商场的营业额就比风和日丽的天气减少了很多。天气变化既然能让不少能应用天气气候的企业家饱尝了甘甜，亦使不少经营者不得不吞咽苦果。

1981 年初夏，上海烟糖公司未了解气象信息，而准备了大量冷饮，但恰遭遇少见的"凉夏"，使 282 万打棒冰、雪糕在仓库整整积压 1 年，仅多支出的仓库保管费就达几十万元。

广东博罗县某实业供销公司，有一年初春，由于未了解气象预报，在四川加工订货 99 t(吨)腊肠，因长时间的阴雨而滞销。在仓库变质发霉而亏本 10 多万元。

夏季西瓜销售量几乎与气温高低呈正相关，有一年 8 月，上海持续低温阴雨，大量西瓜卖不出去，甚至霉烂，造成经济损失达1 400多万元，为了清理 100 万斤西瓜"垃圾"，支出运费 200 多万元。

1999 年南京是"凉夏"，电风扇积压在仓库里，有一家老板得知南昌等地出现高温信息后，组织汽车运往南昌，果然销售一空。

据统计，雨天商场的顾客比平日少 20%。在寒风飒飒的冬季，火锅店的生意火爆。日本洗剂业有一句老话："阳光一照3 000 吨"。意喻人们多在晴天洗濯衣物，只要是大晴天就要消费 3 000 吨洗衣粉。

气象经济学家虽然还是一个鲜为人知的名词，但作为一门新兴学科，其商业价值在国内外已被开发利用。日本住友综合研究所作过一个专门的测算，夏季气温每上升 1 ℃，国民生产总值(GNP)便增长 0.6%。日本 1996 年下半年月气温比往年高出 2 ℃，为消费市场增加 7 200 亿日元营业额。

1985 年国务院办公厅转发了《关于气象部门应大力开展专业有偿服务和综合经营的报告》。同年，国家气象局、财政部联合颁布了《关于气象部门开展专业服务收费及其财务管理八项规定》1999 年 10 月 31 日《中华人民共和国气象法》的公布，都标志着我国气象信息已进入了市场。

二、商品储存与气候

商品受到环境中空气成分、温度、湿度等的作用，就会发生霉腐、虫蛀、锈蚀、老化、熔化、串味等变化。

(一) 商品储存的不利气象因素

1. 水凇、地潮、反潮

空气中的水汽由气态变为液态的现象叫水凇，地坪上出现水珠凝结叫地潮。一般气温为25～30 ℃，库内外温差大于等于 5 ℃时，水汽就会接近或达到饱和。江淮流域在梅雨季节，有1/4 的时间库内外温差大于等于 5 ℃，有 1/2 时间库外相对湿度高于库内。梅雨结束后的盛夏，上述情况仍达 1/2 和 1/3 的时间。

夏季，库内地坪温度一般比气温低，两者差值达到 3 ℃以上就会出现地坪结露。地潮量最大出现在 6 月中旬到 8 月中旬，最易出现的地方是库房的低层。库房地坪对地下水蒸发的阻隔作用因材料不同而异。防止水凇可采取以下方法：气幕隔湿、机械吸湿、密封挡潮、提温降湿（高温季节进行早晚或夜间通风，可使库温升高 0.5 ℃，降湿 3%～4%），春季通风（为雨季前的缓冲调节）等。

2. 商品霉腐和虫蛀的气象条件

商品的霉腐是因霉菌、酵母及细菌等微生物寄生在商品上引起的。由于微生物细胞中有70%～85%的水分，所以多数霉菌当相对湿度大于 80%，气温在 20～35 ℃是霉菌适宜生长繁殖的条件。

微生物对于低温的忍受能力较强，如酵母菌当气温在－13 ℃以下时，24 小时不死。细菌芽孢和霉菌在－19 ℃以下可活半年。霉菌多为中温性微生物，低于 10 ℃不易生长，接近 0 ℃趋向休眠，低于－40 ℃才完全停止活动。但是，环境温度高于最高生长温度时微生物致死，而且温度超过得愈多死亡愈快。例如芽孢杆菌在60 ℃时需 30 分钟致死，70 ℃时需 10～15 分钟等。

使霉菌可能生长繁殖的最低相对湿度为 75%，称为商品生霉的“临界湿度”。另外，商品含水量愈高，所需的温度也愈低。

防止霉腐除控制温度和含水量外，还可利用辐射杀死微生物。绝大多数微生物仅需日光照射 1～2 小时即可死亡。

虫蛀对商品危害极大，尤其对化纤织物。仓虫的生存温度为 0～40 ℃，适合繁殖的温度为25～35 ℃，高于 40 ℃仓虫体内蛋白凝固，低于 0 ℃体液冻凝。

白蚁活动隐蔽，在阴潮通风不良的库房危害较重，每年 3～6 月白蚁长翅繁殖，蚁分飞移殖，在江淮流域 4 月下旬至 5 月上旬飞出。白蚁飞出时仓库要关闭门窗，对分飞后的传播场所喷药消毒。

仓虫防治的理化方法。控制温度可以杀死仓虫，不过需根据各类仓虫不同的致死温度和致死时间采用不同的措施。一般冷冻温度以－30～－5 ℃为最有效。此外，还有高温、电离辐射、微波等。如采用 C0-γ 射线辐照法时，在害虫适宜温度或有效高温下害虫致死时间短，反之则长。

（二）商品储存适宜气象条件

1. 粮食储存

粮食主要受大气温度的影响，有时也与粮食呼吸或微生物生命活动有关。正常情况下，粮温随外界气温的升降而升降。入仓粮食的呼吸作用与气温有关。粮温在 15～50 ℃内，气温愈高呼吸能力愈强，粮温大于 50 ℃不能进行呼吸作用，小于 10 ℃呼吸能力大减，0 ℃左右时，呼吸能力明显受到抑制。

粮食温度在 25～30 ℃内霉菌大量繁殖，34～38 ℃时发酵菌相继发生，籽粒出现发酵气味，50 ℃时色泽变暗和变黑，放出酒精气、酸气和氨气，20 ℃以下抑制各种菌类。

粮食害虫主要指米象(牛子、米蛀虫)、绿豆象、锯谷盗。它们在25～35 ℃内最活跃,低于17 ℃不能生长发育,低于12 ℃不能正常生长。同时,粮食水分小于12%它们也不能正常生长。

为了防止仓虫侵染,北方常可采用湿粮冷藏,即通过制冷使粮温和仓温保持在规定的低限温度范围及高于以往的安全界限水分的条件下储存。南方采用干粮冷藏,如大米长霉的水分含量界限为14.5%,与之相应的相对湿度为75%,若其含水量17%,则在10～15 ℃的低温仓内能安全过夏。

2.蔬菜、水果的储存

冬白菜储存适宜气象条件为温度在－2～2 ℃,相对湿度80%～90%,蕃茄、茄子、香蕉的储存温度不能低于10 ℃。蒜苗、洋葱和各种水果应储存在温度在0～－10 ℃,相对湿度在80%～90%的仓库内。

水果储藏保鲜的关键是降低水果的呼吸强度,以降低新陈代谢。保鲜方法有三种,低温储存,冷库温度保持0 ℃或零下几度;气调法储存,用自然或人控方法使含氧量达2%～4%,CO_2达3%～5%;减压储存,先稍提前采收后立即减压储存,奶糖和酥糖含油脂成分,在潮湿或高温下,被氧化易出哈喇味,巧克力夏季储存温度不应高于30 ℃。

3.百货和家电储存

当气温大于20 ℃,相对湿度在80%时,家电产品的绝缘材料开始受潮,导致电气绝缘性下降,而且高温、高湿的天气愈多,持续时间愈长,影响程度愈重。

有些商品怕热,如香脂、腊纸、复写纸、油毛毡、腊烛、皮带腊等,在25 ℃以上易发粘、熔化、变形。有些商品遇冷结冰,如墨水、广告色、浆糊等在－4 ℃就可结冰,温度回升解冻后外观和质量均发生不同程度的变化。这些商品应按各自的储存条件储库。乳胶制品应储存在阴凉干燥的库房,温度在15～30 ℃,相对湿度60%,避日光直射。皮革易受潮、起霉、生虫,吸水超过安全含水量16%～18%极易生霉。电池在相对湿度大于75%时毛细管凝集显著增大而变质,湿度过大使锌壳外形成微电池,当温度在－10 ℃以下时,电解液冻结,高温时化学反应急剧增大加速锌筒腐蚀。储存的适宜温度为0～27 ℃。电池在高温30 ℃以上储存2个月,相当在20 ℃条件下储存1年。

4.纺织品的储存

纺织品的保管性能是指其受外界气象条件的影响而发生霉变、虫蛀、变色、老化、脆损等的特性,所以有五怕。

怕潮湿,棉织品在相对湿度大于90%时,可吸收自身重量1/4的水分。当温度在25～35 ℃,相对湿度大于75%最易生霉。

怕闷热,棉麻粘胶纤维织品在温度高、不通风下加速吸潮,发热生霉;羊毛在持续高温下油脂干燥、强力降低、退光粗糙、硫化色布脆损。

怕虫蛀,羊毛成分中角蛋白含量大于97%,是蛀虫喜食营养。

怕日晒,长日照使棉织品和粘胶品逐渐氧化,降低强力。绵纶、丙纶最不耐晒。浅色、漂白织品晒后易褪色和泛黄。黄橙红色等光脆性染料印的花布,少数硫化染料或基性染料染的棉布易被还原染料,并使纤维脆化。

怕灰尘(静电吸尘),当相对湿度在70%左右时不易积累静电,相对湿度下降到50%,静电不易散失并逐渐积累。棉纱在一定摩擦速度下,且相对湿度在50%时,带电压100V,在65%时表面电压为零。

各类纺织品的储存适宜气象条件，适宜温度在 25～30 ℃，相对湿度在 65%～75%。

商品的储存与天气气候变化有密切关系，为此，就必须根据温、湿度的变化规律，利用风向、风速来掌握启闭门窗进行自然通风调节。当空气湿度大特别是雾天时，应关闭仓库的门窗，而天晴库外湿度小时，打开门窗使库内干燥，遇到连阴雨特别是梅雨天气时，就要采取人工吸湿的措施。

第九章　21世纪应用气候学发展趋势

第一节　应用气候与经济建设的战略意义

在整个文明发展史时期，过去和现在气候都给予人类活动以重大影响。但是，在全部文明史内，整个气候问题包括诸如气候变化的长期趋势、气候变率、气候异常、阐明气候变化的物理机制，气候对人类活动的影响和人类活动对气候的反作用，都从来没有像近二十几年来那样引起广大科学界、政府机构以及气候情报用户的兴趣。

这与许多情况有关，特别是同经济活动规模大大扩大和社会对气候及其变化明显增长的依赖关系有关。

生产力发展的迅速增长正在造成并已经造成这样一种情况，即一连串的经济活动部门和整个国家对变化着的气候条件的依赖程度，不是降低而是在增长，并随着生产的增长而增强。正是这个缘故，近年来，从事社会经济发展计划和生产管理部门，越来越理解国民经济和社会繁荣对气候变动的依赖关系。

提高对气候及其变化问题兴趣的推动力，在很大程度上是近年来严重影响许多国家经济甚至某些国家生存条件的一系列大的气候异常。在许多情况下，气候异常的后果还涉及国家之间的关系。

同时，由于经济活动，人类本身开始对气候产生意想不到的影响。这种影响暂且仅局限于有限的范围内，只影响局部地方的某些气候特点。但是在人口增长和人类更强烈的活动叠加的条件下，人们能在广阔的空间上，甚至在以后几代子孙的生活中使气候发生出乎意外的变化。

由此可见，气候对社会和经济影响是不能忽视的。天气预报是气象部门最主要的服务手段，但气候也是一种很重要的手段。世界气候计划指出："为了人类本身经济活动和环境活动的利益，已广泛地应用了气候规律，以检验气候的难以预测变化的危害性。"

为了人类本身经济活动和环境的利益，已经广泛应用气候理论，以减轻气候的难以预测变化的危害性。

气候应用是对保障不同时间结构人类活动的二个方面，即规划和设计；业务和管理是必不可少的。所以先是分析气候对人类社会活动和经济建设的作用。任何一项建设工程的设计都要应用气候要素的一些均值、极值、重现期、频率、概率和保证率等。即使基本资料都已便于利用，但仍有再将这些资料变成适合不同类型用户要求的派生资料。例如，基本气象资料可以派生的指标值，如风压、风能功率密度、风振、雪压、最大可能降水、积温、可能最大综合荷载等。这些指标值常常影响到基本建设的投资。其取值合理与否关系到建设工程的经济、适用和安全。

如果在做长期战略决策时没有考虑或考虑不周。则要在未来的管理中和业务工作中最佳利用短期天气预报作临时的防御措施，抗拒极值几乎是不可能的，或者是花费更大的财力。例如，一次台风吹毁了建筑物，若在设计时，没有充分考虑气候极值的出现概率（也就是建筑风压标准值），天气预报即使完全正确，也避免不了建筑物受破坏。如1988年8月台风在浙江象山

附近登陆，倒房6万多间，沉没运输船390余只，渔船854只。杭州市房屋也有倒塌，全市停电、停水、交通中断等。又如1969年7月28日在汕头登陆的台风10分钟平均风速34 m/s，瞬时风速达52.1 m/s，造成倒房几万间，倒电杆等。究其原因，大都是没有按国家规定的风压值设计造成的倒房、倒输电线杆。

类似的例子在国外也有，美国华盛顿州，塔康马(Takoma)峡桥是世界上最长的悬桥之一，桥长1 662 m，由于设计时风振考虑不多，于1940年在风荷载的动力作用下摧毁。

英国渡桥(Ferrybridge)电厂的8座巨型冷却塔，塔高114.3m，分两排，由于设计时风压比规定的约偏小10%，在1965年11月1日的大风中吹倒后排3座塔。

日本本州岛的名古屋于1959年9月20日遭受强台风袭击，但是习惯于台风肆虐的名古屋人则对气象局发出的台风警报并不在意，甚至置之不理，结果由于大风、海潮以及洪水的影响，通讯中断、交通阻塞，本州岛中部的工厂全部关闭。据报导，这次台风共造成5 000多人丧生，3万多人受伤，4万家庭受损，总经济损失20亿美元。

以上是风的例子，其他要素也是如此，我国1975年8月河南特大暴雨，造成了垮坝，部分原因与设计水坝时，对可能最大降水估计不足所致。

又如湖南1954年底至1955年初，发生一次严重的冰凌，全省普遍冰冻十余天，电线覆冰最大厚度均超过10 mm，湖区达50～70 mm，沅江最大达120 mm，南岳衡山冰冻达320 mm，大部分供电线路发生断线和倒杆事故，工厂停电，损失很大。造成这次事故的原因，主要是在设计中把积冰厚度估计偏小所致。

类似的例子不胜枚举。所以，气候指标值是设计时的基础，具有战略意义。天气预报只能作为临时的防御措施，具有战术的作用。所以，若气候指标值取得不正确，不可避免地要造成很大的损失。

气候应用有它的潜在作用和价值，有些人不了解这一点，当然这可能是因为气候指标值(极值)是长远起作用的，在一段时间内未出现气候极值，即使取值不确切在短期内也不会被人们发现，人们往往就忽视其价值。

在最近些年里，一些国家政府和民众对国家经济和人类福利事业，对气候和气候变化的依赖关系的认识已有了显著而迅速的提高，这些国家在经济上和生态环境上，已变得越来越相互对气候的依赖，这是由于近些年来大量世界性的气候变动，尽管多半不是异常气候变动，但有些变动的影响也显得特别突出，所以一些国家普遍认为，气象学在长期战略经济活动中，除了天气预报有重要作用外，还需要更广泛、更深入地利用气候学和气候变化的理论。

第二节 应用气候学发展趋势

一、应用气候发展

可持续发展是指资源环境与永续利用。气候作为一种自然资源，大致是在1979年2月底在瑞士日内瓦召开的世界气候大会上，会议主席罗伯特·怀特(Robert M. White)在他的《发展时期的气候》主题报告中提到："这次大会的实质性的准备中产生了一个重要的新观念，这就是我们应当开始把气候作为一种资源去思考。"《世界气候计划》长期计划1988～1997年，在其前言中第一句话就指出："气候既是有益于人类的一项重要自然资源，又可能导致自然灾害。"

资源是与物质财富生产有关的原材料和能源。气候资源就是可以在生产物质财富中作为基本环境条件和能源利用的那些气候要素。气候资源具有波动变化和可再生的特点。

应用气候学就是研究充分而合理地开发利用气候资源,加速经济的发展,获得显著的经济效益。另一方面,在极端情况下,确实会出现气候灾害,应用气候研究以减轻气候的难以预测变化的危害性。

气候信息能应用于国家各种不同的计划和业务活动中,而且,粮食生产、水力资源、太阳能、风能、交通通讯、人类卫生和新居住环境的建筑设计、旅游和体育活动等最易受到气候的影响,长期以来应用气候在这些方面的社会经济活动中已有所发展,并且也提出了适应于区域的和当地气候环境的相应指标。在我国虽已为有关部门提供了有实际使用价值的应用服务,但却不能用来定量地解释气候的成因和许多其他有重大科学及实际意义的问题,所以还需要注意到过程(形成这些观测现象的原因)和物理数学模拟的研究。

应用气候的内部结构与外部联系是很复杂的,弄清气候自身的软科学,才能优化学科内外结合,并产生强大的生长机能。为了计算和预测气候系统本身,包括人类影响气候的特性以及气候与其他自然环境和人类社会的关系,都需要以气候资料为依据。随着社会经济的发展,对气候资料的要求也不断的深入。如应用气候中与人类生物气候中,存在着多元因变量和多元自变量的关系。研究人体感觉温度,人对气温感觉与人体新陈代谢率(活动)、年令和服装有关(多元因变量),同时与气温、水汽压、风速和辐射温度有关(多元自变量)。数理统计的多元分析,大多是多元自变量对一元因变量的。虽然"典型相关分析"算是多元对多元的,但是作为线性问题处理,局限性大。处理多元对多元问题的一个进展是把多元变量作自然正交分解,提取主因子,减少变量数目,以便进一步处理,这个办法的不足是仍然局限于线性处理。今后创立或引入多元对多元的更好方法,可以使应用气候涉及到的多变量问题取得更客观、精确的结果。

气候应用中还存在一个很大困难,在没有测站网的地点如何推求其较为准确的气候值。气象要素在空间是连续分布的,如气温、气压等,从几个点的观测值可以内插出所需地点的值。对于有些气象要素其空间分布的连续性较差甚至是离散的,如雷暴、暴雨、覆冰、大风、雾等,内插误差很大,在复杂地形下内插值甚至没有意义。为此建立模型推求无台站地点的气象值,利用三维或四维模式,解决没有观测的地点的气象设计值显得非常必要。

二、21世纪应用气候学发展趋势

随着科学技术的发展和社会经济的发展,应用气候学的应用领域也在不断地扩展。21世纪将面临着新的问题和新的机遇和挑战,这也表明了应用气候具有新的发展前景。诸如水利枢纽、核电站、太阳能电站、航天地面设施、大跨度悬桥,超高层建筑等,这些重大的工程要能抵御自然灾害的袭击。在规划、设计的阶段就要考虑未来可能发生的最严酷的气象灾害,从根本上防范,保证安全,必须要以气象极值作为设计依据。龙卷风在一般建筑设计中是不考虑的,但对核电站的设计就要考虑龙卷风的影响。龙卷风的极高风速的冲击及其产生的飞射物对核电站设备和构筑物的撞击以及龙卷风中心通过核电站时,产生的突然的压力降,有时可达 20 kPa,如果构筑物不能充分通风使内外压力迅速平衡,就可能引起爆炸。又如水利枢纽工程需要最大可能降水,即在一定区域的气候条件下,某一时段内从气象上说可能发生但不可能超过的最大降水量。这些极值不能只给出小概率事件。通常从概率论计算"万年一遇"的值,在1万年内出现一次的概率为63.2%,其危险率颇高,这不是真正意义上的极值。工程建设要求的极值,应

当以指定的设计基准概率值的概念为根据，以物理学（力学、流体力学、热力学等）定律为依据，按动力气象学的思路，按系统工程学的理念，建立起方程组成模式，输入精确的观测值或实验值求解，这比利用概率计算更具有物理学基础。今后推求极端气象事件应该按这个方向去研究。

当前，人口增加、环境恶化、资源短缺已成为全球性的问题。我国面临的形势更加严峻。我国人口增长在近中期内不可逆转，据估计至 21 世纪中叶初，我国人口将达到 16 亿，不考虑人均消费水平增加的需要，单按温饱需求估算，约需粮食 6.4 亿吨。但我国耕地只占国土面积的 14%，人均耕地 0.11 hm^2，只有世界人均水平的 1/3，至 2030 年人均耕地还将减少 1/4。

我国人均水资源仅为世界水平的 1/4，并且还在不断下降。同时，我国生态环境正日益恶化。土地荒漠化加剧，荒漠化土地面积已占国土面积的 27%。地面 O_3 浓度在部分地区超过对农作物的危害标准，而且呈上升趋势。我国已成为继欧州和北美之后世界第三酸雨重污染区，酸雨对一些地区的农业生态也造成一定危害。同时，“气候变暖”不但对降水，尤其对蒸发有着巨大的影响，也应进行模拟研究。

人口增加对粮食需求的压力，农业自然资源的短缺，农业生态环境触目惊心的恶化事实，无疑给农业可持续发展带来很大的隐患。

气候资源是发展国民经济尤其是农业生产的基本环境条件和物质能源。农业气候资源是农业发展最富潜力，又需合理开发利用的一种自然资源。虽然在一定的时间和空间范围内，农业气候资源是有限的，农业气候资源与人口增加、食物安全、可持续发展之间也存在矛盾和不协调的地方。但是随着生产的发展和科技的进步，人们不断开发农业高新技术，加强光合作用理论研究和现代生物技术研究，培育光能利用率高的高产、优质、抗逆性强的作物新品种。研究不同气候类型区域光温水资源合理配置，提高综合气候生产潜力的有效途径。

同时，还要研究气象灾害对农业生产造成的严重不利影响，合理利用农业气候资源趋利避害，正确进行农业布局，发展农业生产的气候途径。为了减轻气象灾害对农业的影响，应研制出一系列工程技术和物理、化学、生物、技术在内的农业气象灾害防御技术。

洁净能源的发展，世界上一些著名分析预测研究机构认为，21 世纪中叶即 2050 年前后，太阳能、风能、生物质能等再生的清洁能源在世界能源构成中将占 50%的份额，那时太阳能将成为世界可持续发展的基础能源。但也有人怀疑这一预测。科学地看待这一问题，全球今后每年平均消耗能源当量$35\sim50\times10^8$ t，即在 30～50 a 年内石油贮量不会超过 2×10^{11}t，石油资源将枯竭。而用煤炭消耗来弥补石油不足，是一条以环境为代价的能源发展道路，是完全不合理的。据测定，直接燃烧 1 t 煤，产生粉尘 3～11 kg，SO_2 60 kg，NO_2 3～9 kg，还有大量 CO_2。煤炭的燃烧是造成全球环境恶化的主要原因。根据 1992 年联合国召开的世界环境与发展大会的要求，煤炭的消费不仅不能增加，而应予以限制并逐步减少。

人类可以用许多方法减缓全球环境恶化，节约能源和提高能源利用率是一种办法，而加大对清洁能源的开发利用可能是最好的解决办法之一。洁净能源中核能利用，因核安全和核废料处理技术尚未完全解决，在发达国家基本上不发展，发展中国家还会新建一些核电站，总的来说不会有大的发展。所以太阳能、风能和其他可再生能源会成为替代石油和煤炭逐渐成为世界能源的主角。所以气候应用于太阳能、风能的发展计划将有重大的价值。

太阳能有昼夜的缺陷。故国外科学家提出，在太空建立卫星发电站。光在太空的能量要比在地球表面的能量大得多，因为光在穿透大气层时能量要遭受很大的损失。科学家希望利用人

造卫星在地球以外 3.6×10^4 km 的高空接收太阳能，将这种能量转化为微波，通过微波射线直接传输到地球上的接收站，转化为电能供人类使用；或是通过一个巨大的反射镜将阳光反射到地球上，以便延长部分农业耕作区的日照时间，并为那些冬季没有日照的城市提供照明。现在已经有一些科学家专门为此成立了公司，他们坚信，人类在不远的 20～30 a 的时间便可以通过这种方式，使用这种清洁而且取之不尽的能源。

电力气候研究的焦点是复杂地形上的线路覆冰和风速设计值。迄今主要是对有限的实测资料作统计分析，探求其规律。今后应更深入地研究形成覆冰和大风的物理过程，以及地理环境和大气过程的相互作用，建立起动力学和统计学结合的模式，并开展为此所需的特殊观测，才能为服务工作提供更坚实的基础。

医学气象主要研究疾病高发或流行的预报。在目前和将来相当一段时期内，统计方法还是分析天气和发病关系的主流方法。应该倡导学习和使用数理统计方法，同时，要探索流行病学、人类生物学和统计学相结合的疾病预报模型，为医疗气象预报提供更加坚实的基础。

应用气候过去大都是各个分支分隔进行研究。今后应该在各个分支间建立密切的联系，组织大规模的综合研究。如城市气候、建筑气候、人类生物气候以及人类活动对气候的影响等的综合研究。又如超高压输电线路要求的可能最大综合荷载，即在电线覆冰时的风速和温度。航天、医疗或救难需要的生物极限环境(多个气象要素的综合)。风电场选址与山区气候、小气候的综合研究等。同时，人类本身的活动可以改变气候，因此，必须研究如何避免不利的影响，或者在证明这些不利影响已不可避免的情况下，如何来趋利避害，减少其影响，而获取最高的效益。

参考文献

陈力. 最大蒸发量的计算、分析及其应用. 气象学报,1982,40 (2)
陈惠泉等. 水面蒸发系数全国通用公式的验证. 水科学进展,1995,(2)
崔启武,孙延俊. 论水热平衡联系方程. 地理学报,1979,34 (2)
邓根云. 水面蒸发的一种气候学计算方法. 气象学报,1979 37 (3)
丁一汇,高素华主编. 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究. 北京:中国科技出版社,1995
东北林学院. 森林生态学. 北京:中国林业出版社,1981
范治源. 新疆水分区划及农业开发潜力的估算. 农业气象, 1981 (3)
福井英一郎,吉野正敏编. 气候环境概论. 东京大学出版会,1979
付学功等. 互补相关陆面蒸散发模型在黑龙江流域的应用. 水资源研究,1996, 17 (4)
傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. 大气科学,1981, 5 (1).
高国栋,陆渝蓉. 气候学. 北京:气象出版社,1988
高国栋等. 我国最大可能蒸发量的计算和分析. 地理学报,1987,33(2)
高惠莲. 重冰区线路设计冰厚取值的探讨. 电力建设, 1994 (9)
郭生练等. 流域蒸散发量的气候学计算. 水文,1994,(5)
国家核安全局批准,安全导则核电厂厂址选择的极端气象事件(不包括热带气旋)、核安全法规 HAF0112, 1991. 1～39
国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第5号《气候》. 北京:科学技术文献出版社,1990
国家气候委员会办公室编. 国家气候委员会成立大会文件汇编. 北京:气象出版社,1987
国家气候委员会. 1991～2000年中国国家气候计划纲要. 北京:气象出版社,1990
韩湘玲主编. 农业气候学. 太原:山西科学技术出版社,1999
洪世年,陈文言. 中国气象史,北京:农业出版社,1983
胡明恩,王家祁. 中国设计暴雨的综合研究. 水文,1990, (3),
黄润本,黄伟峰. 论干湿气候指数. 中山大学学报(自然科学版),1980,(2)
康甲顺. 气象因素对风湿性心脏病合并心力衰竭的影响. 西安医学院学报,1984,5 (4)
冷石林. 温室效应对黄淮海地区农田水分平衡的可能影响. 中国农业气象,1992,13(6)
李栋梁,彭素琴. 中国西部降水资源的稳定性研究. 应用气象学报,1992,3 (4),
李锦堂. 20世纪太阳能科技发展的回顾与展望. 太阳能学报特刊,1999,1～14
李军,科左后旗. 流行性乙型脑炎流行病学调查. 中华流行病学杂志,1981,2 (4)
李世奎等. 中国农业气候资源和农业气候区划. 北京:科学出版社,1988
廖祥林. 基本冰厚重现期换算系数. 电力勘测, 1996 (4)
廖祥林. 导线覆冰性质分类和密度浅析. 电力建设, 1994 (9)
刘承文. 疟疾发病率预报的初步探讨. 气象,1984 (1)
刘春蓁. 气候变化对我国水文水资源的可能影响. 水科学进展,1997,8(3),
刘光文. 泛论水文计算误差. 水文,1992,1 (2)
陆永. 上海市1952～1981年30年疟疾流行病学分析. 中华流行病学杂志, 1983,4 (1)
陆渝蓉,高国栋编著. 物理气候学 北京:气象出版社,1987

马有哲等．北京地区急诊死亡与气象要素关系的探讨．气象，1998，24（4）
闵骞．各种小型蒸发器对比观测结果的分析．大气科学研究与应用，1994，(2)
南京气象学院气象系等．南京近300米塔层风的分析．南京气象学院学报，1981，(1)
暖通规范管理组主编．暖通空调设计规范专题说明选编．北京：中国计划出版社，1990
陕西送变电工程公司设计队．820线路覆冰观测站观测报告．水电部规划院技术参考资料，电力，1976（2）
上海市心肌梗塞科研协作组(严济远等)．寒冷对上海地区急性心肌梗塞发病的影响．上海医学，1984，7（11）
沈金安．高速公路．北京：中国科学技术出版社，1991
盛承禹等编著．中国气候总论．北京：科学出版社，1986
施成熙等．确定水面蒸发模型．地理科学，1984，(1)
宋连春．近40年我国东部夏季旱涝气候特征．应用气象学报，1992，3(增刊)
孙济良．水文频率分析通用模型研究．水利学报，1989，（4）
孙立勇，任军，徐锁兆．热浪对炎热地区居民死亡率的影响，气象，1994，20（9）
谭冠日，黄劲松，郑昌幸．一种客观的天气气候分类方法．热带气象，1991，7(1)
谭冠日，黄劲松．气候影响评价的两种统计方法—论广州天气对死亡率的影响．南京气象学院学报，1990，14（3）
谭冠日，严济达，朱瑞兆．应用气候．上海：上海科学出版社，1985
谭冠日．电线覆冰若干小气候特征的探讨．气象学报，1982.40（1）
谭冠日．气候分析应用聚类方法的评价．气象学报，1988，46（2）
谭冠日．全球变暖对上海和广州人群死亡数的可能影响．北京：环境科学学报，1994，14（3）
谭冠日．天气与气候和健康．见：蔡宏道主编的《现代环境卫生学》．北京：人民卫生出版社，1995
唐国安．我国500 kV线路倒塔事故率浅析．电力建设，1994（11）
滕中林．电线覆冰厚度随高度的变化．天气月刊，1959（11）
田学哲主编．建筑初步．北京：中国建筑工业出版社．1982
王本普．计算蒸发力的M. И. Будыко方法之简化与P. L. Penman法的比较，地理学报，1980，35(4)
王炳忠．太阳能-未来能源之星．北京：气象出版社，1990
王覆芳，陈庭金．太阳的寿命．太阳能1981. No. 3
王石立，娄秀荣．气候变化对华北地区冬小麦水分亏缺状况及生长的影响．应用气象学报，1996，7(3)
王守礼等．电力气候．北京：气象出版社，1994
王守礼等．微地形微气象对送电线路的影响．中国电力出版社，1999
王守礼．影响电线覆冰的因素的研究和分析．电网技术，1994，18（4）
王兴荣编著．大气污染源布局，北京：中国环境科学出版社，1992
王衍文等．急性心肌梗塞发病气象条件的研究．气象学报，1985，43（4）
王衍文．气象与感冒、慢性气管炎的关系．气象，1977（2）
魏赞道，蒋宪瑶．流感流行与天气变化关系的初步探讨．贵阳医学院学报，1983（1）
吴谦明．A Typhoon Flood Computation Model in Taiwan，International Symposium on River Mechanics. Bangkok，Thailand，1973，Vol. 2.
夏廉博．人类生物气象学．北京：气象出版社，1986
谢运华．导线覆冰频率分析的进展．电力建设，1999（6）
谢运华．山区线路覆冰观测网和覆冰荷载的确定．电力建设，1993（7）
谢运华．输电线设计覆冰荷载计算方法的对比分析．电力技术，1995（5）
谢运华．用一般气象资料估算输电线路上冰荷载的数学模型的开发．电力建设，1994（6）
徐德源主编．新疆农业气候资源及区划．北京：气象出版社，1989
许金义．六盘水地区的导线覆冰．气象，1985（2）

杨柏松．水产气象．北京：农业出版社，1991
杨齐聪，卢春芬．病毒性肝炎发病与气象条件的关系初探．气象，1988，14（4）
杨吾扬，董黎明．关于风向在城市规划和工业布局中运用．中国科学，1979
杨玉清等．流行性乙型脑炎流行年与低发年监测结果比较．中华流行病学杂志，1991，12(6)
印佩芳等．脑卒中与天气过程的关系．气象，1993，19（12）
詹道江，邹进上．我国可能最大降水研究十年．水文，1985，(1)
张 炜．各种型式蒸发器(皿)水面蒸发量的统计相关分析．水文，1998，(2)
张家诚，罗祥庚．法家路线与我国古代应用气象学的发展．全国应用气候会议文集．北京：科学出版社，1997
张家诚，朱瑞兆，孙安健．中国自然资源丛书(气候卷)．北京：中国环境科学出版社，1995
张家诚．从两次世界气候大会看气候学的发展．地理研究，11(2)93～98
张家诚．季风．北京：气象出版社，1984
张培坤．一个山系的风的分布规律及风能探讨．山地气候文集．北京：气象出版社，1984
张相庭．结构风压和风振计算．上海：同济大学出版社，1985
张养才、何维勋、李世奎．中国农业气象灾害概论．北京：气象出版社，1990
赵宗慈．模拟温室效应对我国气候变化的影响．气象，1989，15(3)
郑积源主编．跨世纪科技与社会可持续发展．北京：人民出版社，1998，1～50
中国建筑科学研究院《建筑结构荷载规范》管理组．建筑结构的荷载．1988
中国科学院地球物理研究所，中国科学院地理研究所．中国气候区划．北京：科学出版社，1959
中国牧区畜牧气候区划科研协作组．中国牧区畜牧气候．北京：气象出版社，1988
中国农业科学院农业气象研究室编著．二十四节气与农业生产．北京：农业出版社，1960
中国亚热带东部丘陵山区农业气候资源及其合理利用课题技术组．中国亚热带东部山区农业气候．北京：气象出版社，1990
中国种植制度气候区划协作组．中国农作物种植制度气候区划．中国农业气候资源和农业气候区划论文集，北京：气象出版社，1986
中国自然资源丛书编撰委员会编著．中国自然资源丛书气候卷．北京：中国环境科学出版社，1995
中华人民共和国城乡建设环境保护部．部标准，建筑气象参数标准(JGJ35-78)试行．北京：中国建筑工业出版社，1987
中华人民共和国国家标准(GB9-98)．建筑结构荷载规范．1998
中华人民共和国国家标准．采暖通风与空气调节设计规范(GBJ19-87)．中国计划出版社，1991
中华人民共和国国家标准．建筑气候区划标准(GBSO178-93)．中国计划出版社，1994
朱炳海，王鹏飞，束家鑫主编．气象学词典．上海：上海辞书出版社，1985
朱平盛等．山东水资源分析及趋势预测．气象，1998，(3)
朱瑞兆，王雷．基本雪压计算中的几个问题．全国应用气候会议文集，北京：科学出版社，1977
朱瑞兆，薛桁．我国风能资源．太阳能学报，1981，2（2）
朱瑞兆，薛桁．中国风能区划．太阳能学报，1983，4（2）
朱瑞兆，祝昌汉，薛桁．中国太阳能，风能资源及其利用．北京：气象出版社，1988
朱瑞兆主编．应用气候手册．北京：气象出版社，1991
朱瑞兆．城乡建筑与天时地利．北京：气象出版社，1992
朱瑞兆．风压计算的研究．北京：科学出版社，1976
朱瑞兆．风与城市规划．城市气候与城市规划．北京：科学出版社，1985.
朱瑞兆．气候应用计划的设想．国家气候委员会成立大会文件汇编．北京：气象出版社，1987
朱瑞兆．我国太阳能·风能资源评价．气象，1984，No（10）
朱瑞兆．应用气候的意义、内容和特点．全国应用气候会议文集．北京：科学出版社，1997 WMO. No. 540.

朱瑞兆．中国风力机潜力的估计．气象科学院院刊，1986，1（2）

朱瑞兆．中国太阳能·风能综合利用区划．太阳能学报，1986，7（1）

祝昌汉．再论总辐射的气候学计算方法．南京气象学院学报，1982（1）

左大康．中国地区太阳总辐射的空间分布特征．气象学报，1963，33（1）

Agricultural Research Service. A Comparison of Lysimeter-derived Potential Evapotranspiration with Computed Values. Technical Bulletin No. 1452 United States, Department of Agriculture, 1972

B Givoni Man. Climate and Architecture. Applied Science Publishers ltd, London Second Edition, 1976

Brodsky H, A S Hakkert. Risk of Road Accident in Rainy Weather Accident Analysis and Prevention, 1988, 20:161～176

Cheng S（程寿全），Tan G（谭冠日）. An Analysis of Weather Affecting Road Traffic Accidents in Hong Kong Accident Analysis and Prevention, 1999

Davenport A G. The Relationship of Wind Structure to Wind Loading. Wind Effects on Building and Structure. London, Ider Majesty's Stationery Office, 1965

Davenport A G. The Treatment of Wind Loading on Tall Building, Tall Buildings 1967

Erik l Petersen, Niels G Mortensen , LARS Landberg. Wind Resource Estimation and Siting of Wind Turbines, European Directory of Renewable Energy Suppliers and Services 1994

Frik L, Pelerson Niels G. Mortensen Lars Landberg, Jrgen Hφjstrap , Helmut Po Frank Wind Power Meteorology, RisφNational Laboratory , Roskilde, Denmark, 1997

Gustavson M R. Limits to Wind Power Utiligation, 1979, 4 (2)

ISO. Bases for Design of Structures-determination of Snow Loads on Roofs, Bef No. 4355～1981(E).

Kalkstein L S, G Tan（谭冠日），J Skindlov. An Evaluation of Objective Clustering Procedures for Use in Synoptic Classification. Journal of Climatology and Applied Meteorology, 1987, 6, 717～730

Kalkstein L S, *et al.* The Philadelphia Hot, Weather-health Watch/Warning System: Development and Application, Summer, 1995. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77 (4)

Kalkstein L S. The Impact of CO_2 and Trace Gas-induced Climate Changes upon Human Mortality. In Smith, J B and D A Tirpak eds《The Potential Effects of Global Climate Change on the United States: Appendix G. Health》U S. Environmental Protection Agency, Washington DC 1989

McMichael A J, Haines A, Sloof R, Kovats S eds《Climate Change and Human Health》World Health Organization, Geneva, 1996

Mearns L O, Katz R W, Schneider S H. Changes in the Probabilities of Extreme High Temperature Events with Changes in Global Mean Temperature. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23. 1601～1613

Powley J F, Tan G（谭冠日）. Potential Air Quality Consequences of Atmospheric Carbon Dioxide-Induced Global Warming in Philadelphia, PA. Middle States Division, Association of American Geographers. 1991 Annual Conference, University Park. PA, USA.

Shan L, et al 谢运华译．覆冰风暴数据库和覆冰等级图．"第七届国际建筑物大气覆冰研讨会"文集，1996年6月3～7日

Tan G（谭冠日）. Potential Impacts of Climate Change on Human Health in China Symposium for United Nations and Nongovernmental Organizations on Potential Impacts of Climate Change. New York, USA, April 14～15, 1992.

Thomas M K. The Nature and Scope of Climate Application , WMO. World ClimateProgramme Technieal Conference on Climate Asia and western Pacific , 1980, 12

Waggoner P E. Agriculture and a Climate Changed by More Carbon Dioxide. in US. National Research

Council, Changing Climate. Washington, DC: National Academy Press, 1983

William R, Schaub, Jr. 王浩译，谢运华校．构筑物表面结冰量的估算方法．"第 7 届国际建筑物大气覆冰研讨会论文集"，1996 年 6 月 3～7 日

WMO. Energy from the Wind, TN (4). 1954

WMO. Meteorological Aspects of the Utiligation of Wind an Energy Source. WMO, TN (176), 1981

Zhu Ruizhao, Xue Heng, Ji Juzhi. The Study of Wind Farms Site-seleclion Techniques Wind Power 1992

Будыко М. И.. Испарение Becmecmlehhglx Условиях, Леннн Грбд. Гидрометеоиздат, 1948

Бучинский ВЕ. Влияние защитных лесонаждений науменшение интенсивноти обледененеиепроводов воздушных линий связи и электропередачи. Труды Всесюзного Науч-ногоМетеорологического Совещания, Том. IV. 1979

Захаров АГ, Соколова СН. Плотность имассагололед но-изморозевых отложений вразличных физико-географических условиях на ЕТСТруды ГГО, ып. 425, 1979

РаевскийАН. Влияние Особенности рельефана распределение Гололедных Отложений. Труды ГГО, вып. 122, 1961

［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝应用气候学概论
作者＝朱瑞兆
页数＝２５２
ＳＳ号＝１１６６３８３１
出版日期＝２００５年１０月